

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y
FLUIDOS**



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN DEL USO Y
PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA
HIDRÁULICA EN HAITÍ**

Autor: Clara Ráez Bravo

Tutor: Ulpiano Ruiz-Rivas Hernando

Leganés, 24 de Septiembre 2014

Abstract

Haiti is the least developed country in Latin America and the Caribbean. Among the countries of the world, according to the Human Development Index, ranks 168 of 182 countries. It has a per capita consumption of electricity really low and most energy is generated through wood. This is causing deforestation and soil erosion. The distribution losses are very high mainly for theft. The gross domestic product has declined in recent years and is growing by international aid.

The main objective of the project is to analyze the situation of underdevelopment of Haiti from the energy point of view. Hydropower is studied as a source for increasing electrification because it is a renewable energy. To carry out the analysis we will conduct a literature review in order to know what are water resources and existing hydropower plants in the country. It also discusses how to increase the power available.

The work is included within the RENET project carried out by the Carlos III de Madrid University (UC3M), in collaboration with Universities in Cuba and Haiti. RENET general objective is to strengthen the top quality education in the field of access and energy efficiency, with focus on renewable energy.

The main problem encountered during the conduct of this project was the absence of data and the disparity between the data of different sources.

Data has been collected from various sources in order to analyze the installed capacity, the available capacity and energy generated from hydroelectric plants. For the installed power have been chosen data from the Inter-American Development Bank (IDB) because it was the source where further appeared as the central power and the area in which they were located. In relation to power available only to the Inter-American Development Bank, as it is difficult to find information for mini hydro plants. Finally, for the energy generated were discarded data from the World Energy Council (WEC) because the value was very high in relation to the available capacity in Haiti, so has been taken as valid data from the International Energy Agency (IEA). In part, the disparity data is due to the lack of an organization dedicated to the energy.

Currently, hydropower plants are in bad conditions in the country because its electromechanical components have completed their useful life. In addition there are problems of sedimentation by overexploitation of forests.

We have made three projects in the plants of Saut Mathurine, Gaillard and Peligre to rehabilitate and increase its installed and available capacity. Renovation projects of hydroelectric Saut Mathurine and Gaillard allow an increase in installed capacity in the South Department of Haiti. Installed hydraulic power multiply by four to existing currently. Available capacity multiplied by six to the present. The proposed draft Hydroelectric Péligre can triple the available hydraulic power and 25% increase in total in Port au Prince.

This work has achieved a sufficient data base for future projects RENET in Haiti. There have also been three drafts to improve the country's hydroelectric plants.

Índice

1. Introducción	5
2. Energía hidráulica.....	8
1. Energía hidráulica en países subdesarrollados	9
2. Centrales hidroeléctricas y turbinas	11
2.1. Turbina Kaplan	13
2.2. Turbina Francis.....	15
2.3. Turbina Pelton.....	17
2.4. Turbina Turgo.....	18
2.5. Turbina Banki	19
3. Análisis de la situación energética en Haití.....	20
1. Situación general.....	21
1.1. Historia.....	21
1.2. Clima	22
1.3. Demografía	23
1.4. Economía	24
1.5. Energía	25
2. Energía para el subdesarrollo.....	26
2.1. Descripción de los indicadores utilizados	26
2.2. Valores de los indicadores para Haití	28
2.3. Representación y análisis de la situación de Haití	29
2.3.1. Producto interior bruto per cápita e índice de desarrollo humano	30
2.3.2. Índice de desarrollo humano y uso de la energía	30
2.3.3. Índice de desarrollo humano y consumo per cápita	31
2.3.4. Índice de desarrollo humano y porcentaje de energía renovable	32
2.3.5. Índice de desarrollo humano y porcentaje de pérdidas	33
2.3.6. Producto interior bruto per cápita y uso de la energía.....	33
2.3.7. Producto interior bruto per cápita y consumo per cápita	34
2.3.8. Producto interior bruto per cápita y porcentaje de energía renovable.....	34
2.3.9. Producto interior bruto per cápita y porcentaje de pérdidas	35

2.3.10. Intensidad energética de algunos países de Sudamérica	35
3. Análisis energético	37
4. Energía hidráulica en Haití	43
1. Energía y potencia hidráulica	44
2. Centrales hidroeléctricas en Haití	47
2.1. Determinación de la turbina para cada instalación	49
3. Estudio de caso: Saut Mathurine	51
3.1. Altura neta.....	52
3.2. Elección del tipo de turbina.....	52
3.3. Potencia útil.....	53
3.4. Velocidad máxima admisible.....	54
3.5. Elección del generador.....	55
3.6. Dimensiones principales de turbina hidráulica	56
3.7. Número de álabes del rodete.....	58
3.8. Resumen de los valores obtenidos.....	58
3.9. Comparación del montaje actual con el anteproyecto realizado	59
4. Estudio de caso: Peligre	60
4.1. Estado y plan actual de Rehabilitación de la Central de Peligre	60
4.2. Estudio del caudal en Peligre	62
4.3. Altura neta.....	64
4.4. Elección del tipo de turbina.....	64
4.5. Potencia útil.....	66
4.6. Diámetro del rodete	66
4.7. Número de revoluciones de funcionamiento	67
4.8. Elección del generador.....	68
4.9. Cámara espiral y tubo de aspiración	68
4.10. Álabes del rodete	69
4.11. Resumen de los valores obtenidos.....	70
4.12. Comparación del montaje actual con el anteproyecto realizado	70
5. Estudio de caso: Gaillard	72
5.1. Altura neta.....	73
5.2. Elección del tipo de turbina.....	73
5.3. Potencia útil.....	74
5.4. Elección del número de chorros y la velocidad específica	75



5.5.	Diámetro del chorro y diámetro del rodete.....	76
5.6.	Diámetro de salida de la tobera	77
5.7.	Número de revoluciones de funcionamiento	77
5.8.	Elección del generador.....	77
5.9.	Resumen de los valores obtenidos.....	78
5.10.	Comparación del montaje actual con el anteproyecto realizado	78
6.	Potencial y efecto de los nuevos proyectos	80
5.	Conclusiones.....	85
6.	Referencias.....	88



1. Introducción

En los países subdesarrollados la forma más económica de conseguir un aumento de la energía eléctrica es por medio de las energías renovables. La construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas permite la electrificación de zonas aisladas en las regiones que disponen de recursos hídricos.

La Declaración Universal de los Derechos Humanos de 1948 establece una serie de derechos que son imposibles de conseguir sin un acceso adecuado a los servicios energéticos. Disponer de energía y servicios energéticos sostenibles y eficientes es esencial para la consecución del desarrollo humano, social y económico, y también es importante para reducir el impacto medioambiental.

Haití es el país más pobre y menos desarrollado de América Latina y el Caribe y aparece en la lista de los países menos desarrollados del mundo. Tiene un consumo per cápita de electricidad realmente bajo y la mayoría de energía es generada por medio de madera, lo que está produciendo deforestación y erosión del suelo. Además, las centrales hidroeléctricas del país, que han sido la principal fuente de energía eléctrica durante décadas, se encuentran muy deterioradas por los años de funcionamiento, y la situación se ha visto agravada por la falta de un buen mantenimiento de las mismas.

El objetivo principal del proyecto es analizar la situación de subdesarrollo en la que se encuentra Haití, centrándose en la energía. Se va a estudiar concretamente la energía hidráulica como fuente para aumentar la electrificación en el país porque se trata de una energía renovable. Los pequeños proyectos de minihidráulica son una solución económica que permite el acceso a la energía moderna a las regiones aisladas. Para poder llevar a cabo el análisis se va a hacer una revisión bibliográfica que permita conocer cuáles son los recursos hidráulicos y las centrales hidroeléctricas existentes en el país, y cuál es la manera de aprovecharlos al máximo.

El trabajo se engloba dentro del proyecto RENET (Renewable Energies Education Network), llevado a cabo por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), la Université d'Etat Haití (UEH), la Universidad de Oriente (UO) y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM). El proyecto se realiza en Cuba y Haití, y tiene como objetivo general fortalecer la educación superior de calidad en el ámbito del acceso y la eficiencia energética, con especial atención a las Energías Renovables, mediante la mejora de las capacidades de formación y fomento de redes Sur-Sur académica e institucional.

El mayor problema encontrado durante la realización de este trabajo es la falta de información sobre la energía en el país y la gran disparidad de los datos hallados. Tampoco se dispone de estudios hidrológicos que permitan conocer suficiente información de los recursos hídricos de Haití.

Con el trabajo se quiere conseguir tener acceso a la información del país y analizar la coherencia de la información encontrada. Para poder aprovechar los recursos y formar a gente para su debido mantenimiento es necesario, en primer lugar, saber cuál es la energía disponible en el país y el estado en el que se encuentran sus instalaciones.

El trabajo está dividido en seis capítulos principales. En el presente capítulo se ha hecho una breve introducción sobre el objetivo del trabajo y la situación en la que se enmarca el proyecto.

En el segundo capítulo se va a realizar una introducción teórica con los conceptos necesarios para el entendimiento del presente trabajo. Se hablará de las centrales hidráulicas utilizadas en los países subdesarrollados. También se hacen distintas clasificaciones de las turbinas y se explican las características que presentan cada una de ellas, para después poder usarlo en capítulos posteriores.

En el tercer capítulo se explica la situación actual de Haití, haciendo un repaso de su historia, el clima, la demografía, la economía y por último, la energía. Esta información es de gran importancia para entender la situación en la que se encuentra el país en este momento, y para poder evaluar los resultados obtenidos del análisis por medio de los indicadores más importantes relacionados con la energía. Todo esto permite abrir un apartado dedicado a la energía en Haití donde se habla de la evolución energética en los últimos años, de las fuentes existentes en el país, y del reparto según los sectores. Por último, se hace una recopilación de datos provenientes de distintas fuentes bibliográficas para la energía hidráulica, que se analizarán en el siguiente capítulo.

El cuarto capítulo se va a centrar en la energía hidráulica en Haití y se hace un análisis de los datos recopilados anteriormente. Se estudian las centrales hidroeléctricas del país. A continuación se eligen tres de las centrales existentes para hacer un anteproyecto de cada una de ellas y determinar los valores principales, así como la potencia que son capaces de generar. Para concluir el capítulo se analiza el efecto de los proyectos propuestos en el aumento de la energía y en el desarrollo del país.

En el quinto capítulo se recogen las conclusiones alcanzadas y los objetivos conseguidos tras la realización del trabajo.

Para terminar, en el sexto capítulo, aparecen por orden alfabético todos los textos, artículos y libros empleados en la elaboración del trabajo, así como las páginas web utilizadas y la fecha de su consulta.



2. Energía hidráulica

1. Energía hidráulica en países subdesarrollados

La energía hidráulica es una fuente de energía renovable. Una central hidroeléctrica tiene como objetivo convertir la energía potencial del agua en energía eléctrica por medio de una turbina y un generador conectado al eje. La potencia eléctrica depende del caudal y de la altura del salto.

Las ventajas que presenta la energía hidráulica (Mataix, 2009) son las siguientes:

- No repercute el precio del combustible.
- En comparación con las centrales térmicas el kWh es entre 4 y 10 veces más barato.
- Los grupos hidroeléctricos necesitan menos de 1 minuto para su puesta en marcha, por eso típicamente se usan para cargas punta y se hacen trabajar a cargas constantes las centrales térmicas convencionales y nucleares.
- Tienen un mayor rendimiento que las turbinas de vapor.
- Hay menos averías y necesitan revisiones menos frecuentes que las térmicas.

Este tipo de centrales se pueden clasificar de numerosas maneras, en primer lugar se hará atendiendo a la potencia, la cual está muy relacionada con el tamaño de la central:

- Gran central: Más de 100 MW. Conectadas a grandes redes de suministro eléctrico.
- Central media: Entre 15 MW y 100 MW. Normalmente conectada a la red.
- Pequeña central: entre 1 MW y 15 MW. Normalmente conectada a la red o para sistemas de generación descentralizada.
- Minicentral: la potencia está entre 100 kW y 1 MW. Sistemas de generación descentralizada o conectados a la red.
- Microcentral: desde 5 kW a 100 kW de potencia. Normalmente suministran electricidad a pequeñas comunidades o industrias locales en áreas alejadas de la red eléctrica.
- Picocentral: hasta 5 kW.

Las centrales con una potencia interior a 100 kW se engloban dentro de las energías apropiadas para la cooperación al desarrollo, ya que al tratarse de pequeñas centrales tienen un impacto ambiental mucho menor que las grandes centrales. Se usan como alternativa a otras energías por: su bajo coste, la necesidad de electrificar zonas apartadas y de difícil acceso, y además ha avanzado la tecnología en este tipo de centrales.

Como se puede ver en la [Figura 1](#) hay una relación inversa entre el costo unitario y el tamaño del sistema, sin embargo con el uso de tecnologías apropiadas las centrales más pequeñas tienen menor coste que las de mayor tamaño, la curva se representa en línea discontinua.

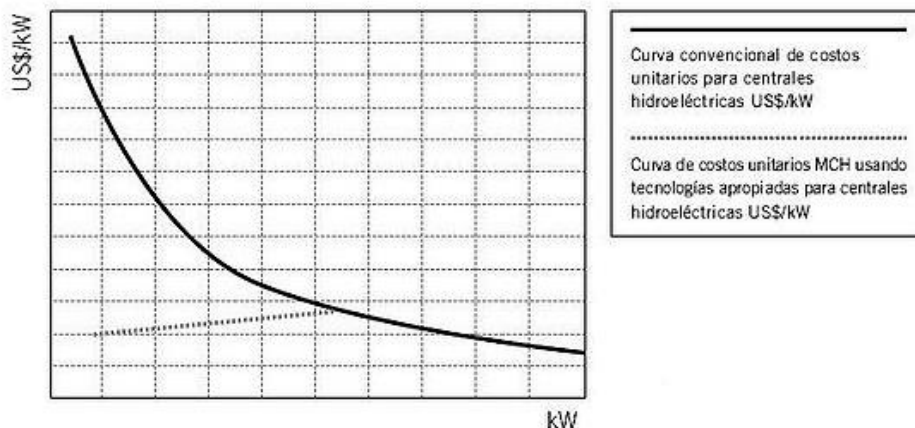


Figura 1: Costos unitarios para centrales hidroeléctricas (ISF, 2014)

En la [Tabla 1](#) se agrupan las centrales según el rango de potencia y se explica cuáles son los usos más comunes:

Rango kW	Tipo de uso
0,2 - 0,5	Se utilizan sobre todo para el cargado de baterías
0,5 - 1	Uso familiar
1 - 5	Usos productivos o iluminación doméstica de pequeños grupos familiares (5 a 30 familias)
5 - 20	Provisión de servicios, usos productivos y también atención a pequeños grupos familiares (hasta 30 ó 100 familias)
20 - 100	Demandas para electrificación de pequeños centros poblados (50 a 300 familias, e incluso más)

Tabla 1: Uso de las centrales según su potencia (ISF, 2014)

La mayoría de autores en el campo de la electrificación rural señalan que el consumo de energía por familia en las zonas rurales es muy bajo. Las cifras están en el rango de los 30 a 50 kWh (ISF, 2014).

Las demandas típicas para zonas rurales son: electrificación para pequeños centros poblados, aplicaciones específicas en transformaciones de productos, provisión de servicios como bombeo de agua, usos familiares y micro negocios.

La energía hidráulica gracias a su avance se adapta fácilmente a cualquier demanda y es posible construir las centrales a precios competitivos en comparación con otras alternativas renovables o de grupos diésel, siempre que se disponga del recurso.

2. Centrales hidroeléctricas y turbinas

Una central hidráulica cuenta con numerosas partes, de las cuales se pueden destacar las siguientes:

- Azud: Muro transversal al curso del río, de poca altura, que provoca un remanso de agua sin producir una elevación notable del nivel. Su objetivo es desviar parte del caudal del río hacia la toma de la central. Aquella parte que no es derivada se vierte por el aliviadero y sigue su curso normal por el río.
- Presa: En este caso el muro que retiene el agua tiene una altura considerable y provoca una elevación notoria del nivel del río mediante la creación de un embalse. En función del tamaño de este se podrán regular las aportaciones.
- Aliviaderos: Todas las centrales hidroeléctricas disponen de dispositivos que permiten el paso del agua desde el embalse hasta el cauce del río, aguas abajo, para evitar el peligro que podrían ocasionar las avenidas. Estas pueden provocar una subida del nivel del agua en el embalse que sobrepase el máximo permitido. Las compuertas y válvulas son aquellos elementos que permiten regular y controlar los niveles del embalse.
- Canales, túneles y tuberías: Según el tipo de la central que vayamos a construir, se necesita una red mayor o menor de conducciones
- Tubería forzada: Es la tubería que se encarga de llevar el agua desde la cámara de carga hasta la turbina. Debe estar preparada para soportar la presión que produce la columna de agua, además de la sobrepresión que provoca el golpe de ariete en caso de parada brusca de la central.
- Edificio de la central: Es el emplazamiento donde se sitúa el equipamiento de la central: turbinas, bancadas, generadores, alternadores, cuadros eléctricos, cuadros de control, multiplicadores, etc. El edificio puede estar junto al azud o presa, situarse al pie de este e incluso puede construirse bajo tierra.
- Elementos de cierre y regulación: son dispositivos que aíslan la turbina u otros órganos de funcionamiento, a la vez que regulan la llegada de caudal. Los más destacados son válvulas y compuertas.
- Turbinas hidráulicas: es el elemento clave de la central. Aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua, transformándola en un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica.
- Generador: transforma la energía mecánica de rotación de la turbina en energía eléctrica.

Las centrales según su diseño y construcción se clasifican en:

- Centrales de regulación del caudal: tienen un embalse que almacena agua y permite elegir el caudal a turbinar. Son más costosas pero permiten producir electricidad todo el año si se dispone de agua embalsada. Se puede diferenciar entre centrales a pie de presa y centrales con tubería de derivación. Las primeras se usan para desniveles medianos, sin embargo cuando hay grandes desniveles es necesario usar una central con tubería de derivación.
- Centrales de agua fluyente: estos aprovechamientos no disponen de embalse y sólo funcionan cuando el caudal que circula por el río es superior al mínimo de la turbina instalada. A veces tienen un pequeño embalsamiento.
- Centrales de bombeo: poseen dos embalses a distinto nivel, lo que permite turbinar del alto al bajo y bombear del bajo al alto. Para bombear el agua consumen la electricidad sobrante, sobre todo por la noche.

Según la dirección del agua en el rodete se diferencian los siguientes tipos de turbina:

- Turbinas radiales: el agua fluye en dirección radial hacia el eje. A este grupo pertenecen las turbinas Francis muy lentas.
- Turbinas axiales: el fluido se mueve axialmente en círculos concéntricos al eje. Las turbinas Kaplan son de este tipo.
- Turbinas semiaxiales o diagonales: son la mayoría de turbinas Francis y en ellas el agua se desplaza en dirección axial y radial.
- Turbinas tangenciales: como su propio nombre indica el fluido se mueve en un plano tangencial, como en las turbinas Pelton.

También se puede clasificar según el grado de reacción de la turbina (σ), entendiéndose como la relación entre la altura de presión del rodete (H_{p-rod}) y la altura efectiva (H). Si $\sigma = 0$ se trata de una turbina de acción y si es distinto la denominaremos de reacción.

Las turbinas de acción se caracterizan por trabajar a presión atmosférica. El inyector es el encargado de transformar la energía de presión en energía cinética del chorro, que incide sobre las cucharas del rodete. No tiene tubo de aspiración, y la salida del rodete se produce a presión atmosférica. Como sistemas de protección la central cuenta con una pantalla deflectora para desviar el chorro y que no se embale. La admisión se regula mediante una válvula de aguja, accionada por un regulador de presión, la cual también, evita el golpe de ariete. Actualmente las turbinas de acción que más se construyen son las Turbinas Pelton.

En las turbinas de reacción la presión a la salida del rodete es menor a la presión atmosférica. En el distribuidor se transforma parte de la energía de presión en cinética. El más usado es el distribuidor Fink que con sus álabes orientables permite distribuir el agua por toda la periferia del rodete. Los álabes o paletas del rodete trabajan completamente sumergidos. A la entrada en el rodete la presión es superior a la atmosférica, pero a la salida es menor gracias

al tubo de aspiración. Este tipo de turbinas cuentan con un orificio compensador para evitar el embalamiento.

Las turbinas de reacción se usan principalmente para saltos medianos y pequeños y las más utilizadas son las turbinas: Francis, de hélices, Kaplan y Dériaz.

Dentro de esta última clasificación según el diseño del rodete distinguimos los siguientes tipos:

2.1. Turbina Kaplan

Las turbinas de hélice son las predecesoras de las turbinas Kaplan y fueron desarrolladas por la necesidad de adaptar las turbinas a velocidades mayores. Son turbinas axiales y como todas las turbinas de reacción son de admisión total, es decir, el agua entra por toda la periferia del rodete. Tienen un buen rendimiento a carga normal, pero este disminuye muy rápidamente cuando las condiciones de trabajo son distintas a las de diseño, esto queda representado en la [Figura 2](#), donde se puede ver su curva de rendimiento en forma de gancho.

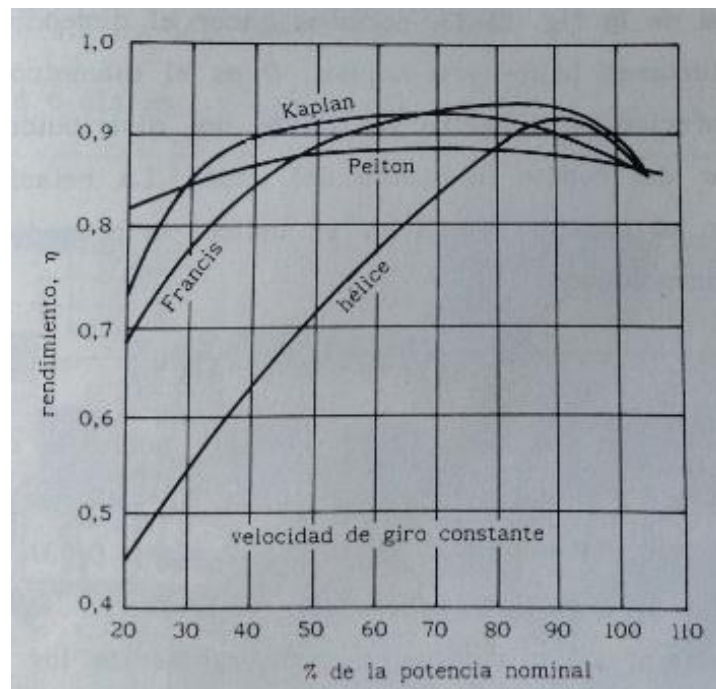


Figura 2: Rendimiento de los distintos tipos de turbina según la carga (Agüera, 1992)

Fue un ingeniero austriaco en 1916 quien se dio cuenta que si se construía una turbina de hélice con álabes orientables, que se movieran según iba variando el caudal, se podía mejorar el bajo rendimiento que caracteriza a las turbinas de hélice. El flujo de agua entra por el distribuidor y mueve los álabes de la turbina, [Figura 3](#). Las turbinas Kaplan tienen una curva de rendimiento plana y su rendimiento a cargas intermedias es superior a las turbinas de hélice y a todas las turbinas Francis. Su potencia normal es del orden de $2/3$ a $3/4$ de la potencia nominal.

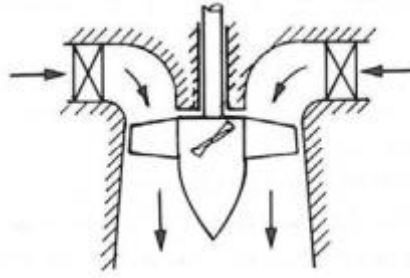
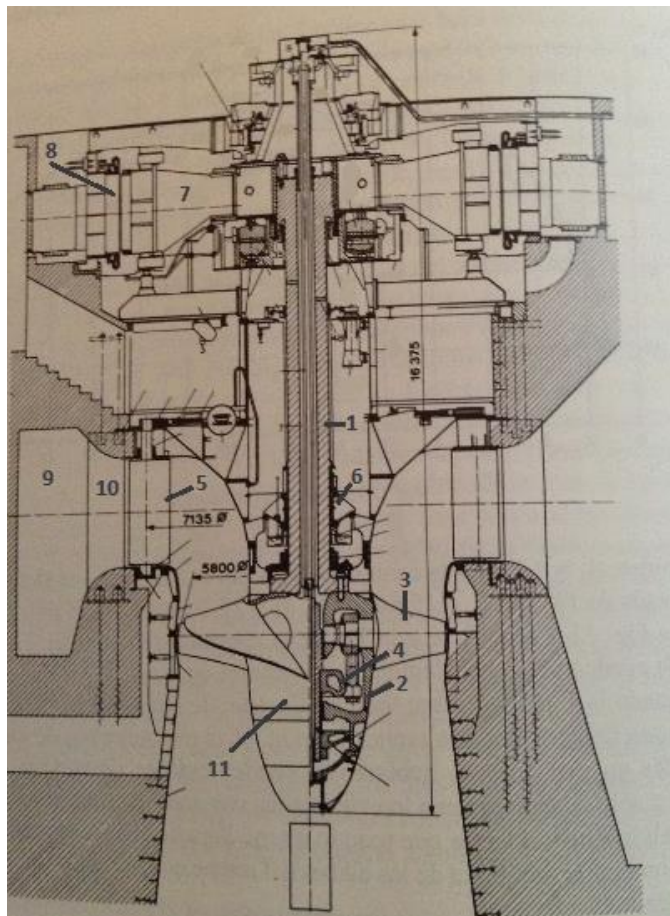


Figura 3: Dibujo Turbina Kaplan (Viedma y Zamora, 2008)

Los álabes orientables tienen la ventaja de que pueden variar su inclinación para conseguir que en cualquier punto de funcionamiento coincida con la dirección del flujo a la entrada del rodete. El cambio de posición de los álabes del rodete se realiza con un servomotor colocado preferentemente en el cubo de dicho rodete. Se puede ver las partes en la Figura 4.

La cámara del rodete es la cámara fija en la que se aloja el rodete. De esta parte depende en parte el rendimiento de la turbina y debe ser desmontable para poder acceder a los álabes sin necesidad de desmontar el alternador. El distribuidor cuenta con unos álabes y se encarga de regular el flujo y de imprimir el ángulo necesario para la entrada del agua en los álabes.



PARTES PRINCIPALES DE UNA TURBINA KAPLAN

1	Eje
2	Cubo del rodete
3	Álabe
4	Mecanismo orientación de los álabes
5	Álabe directriz
6	Cojinete guía
7	Estator
8	Rotor
9	Distribuidor
10	Álabe del predistribuidor
11	Rodete

Figura 4: Corte longitudinal de una turbina Kaplan y partes principales (Mataix, 2009)

Las ventajas principales que presentan estas turbinas son:

- Buen rendimiento a carga parcial gracias a los álabes regulables.
- Alta velocidad específica y alta capacidad de absorción.
- Gran capacidad de gasto de admisión.

Las turbinas Kaplan han tenido un gran desarrollo y actualmente dominan en los saltos de pequeña altura y caudales grandes. En los de mayor altura están entrando en competencia con las turbinas Francis. La velocidad específica (n_s) puede llegar hasta 900. La potencia también ha ido aumentando.

2.2. Turbina Francis

La turbina Francis fue diseñada en 1849 por un ingeniero inglés y sustituyó a las turbinas de reacción anteriores. Es de admisión total y esto permite repartir el caudal y que el rodete sea menor al de una Pelton equivalente. Inicialmente la turbina era totalmente radial, pero con el tiempo se vio la necesidad de hacer el rodete con una componente axial a la salida para facilitar la descarga del agua y poder reducir el diámetro del mismo. Las turbinas Francis pertenecen al grupo de turbinas semiaxiales. El flujo circula como se representa en [Figura 5](#).

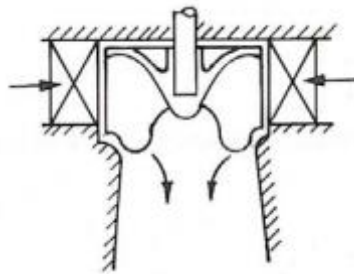


Figura 5: Dibujo turbina Francis (Viedma y Zamora, 2008)

El agua procedente del embalse entra en una cámara espiral, [Figura 6](#), de sección circular o rectangular, que se encarga de hacer uniforme la velocidad de entrada del agua por toda la periferia del distribuidor. El distribuidor está formado por álabes guía que van girando accionados por un servomotor, para modificar el área de los canales y ajustar el caudal a la carga de la central. Cuando hay más de una turbina en la misma central puede evitarse la regulación de alguna, que funcionará con carga constante y tendrá los álabes guías fijos.

El órgano más importante de estas turbinas es el rodete y los restantes elementos se construyen en torno a él. El tubo de descarga o tubo de aspiración permite recuperar gran parte de la energía cinética a la salida del rodete.

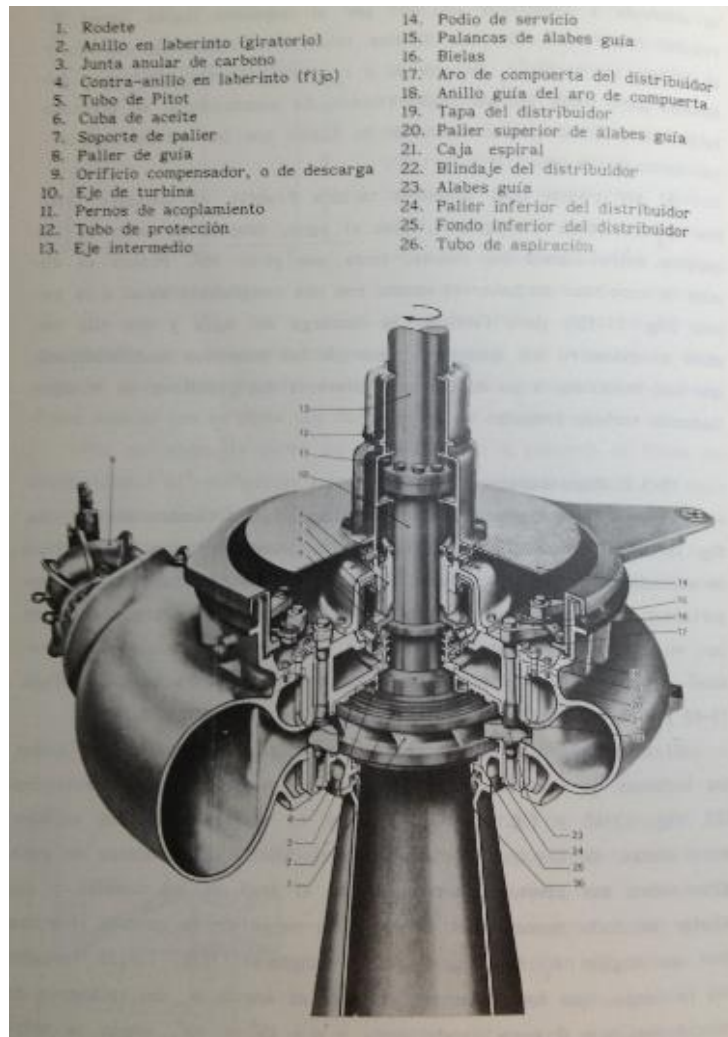


Figura 6: Corte en una turbina Francis y sus partes (Agüera, 1992)

Las principales ventajas son:

- Su diseño hidrodinámico permite bajas pérdidas hidráulicas, por lo cual se garantiza un alto rendimiento.
- Su diseño es robusto y tiene un bajo coste de mantenimiento. Además funciona durante décadas.
- Dimensiones generalmente más pequeñas que otras turbinas como las Pelton. Permiten altas velocidades de giro.
- Junto a la tecnología y a nuevos materiales, las nuevas turbinas requieren cada vez menos mantenimiento.

Las grandes turbinas Francis se diseñan de forma individual para cada emplazamiento, a efectos de lograr la máxima eficiencia posible, habitualmente más del 90%. Son muy costosas de diseñar, fabricar e instalar, pero pueden funcionar durante décadas. También pueden usarse para el bombeo. El campo de aplicación es muy extenso, pueden emplearse en saltos de distintas alturas dentro de una amplia gama de caudales, hasta 200 m³/s. Las velocidades específicas están comprendidas entre 40 y 450. Las turbinas Francis tienen muy buen rendimiento entre el 60 % y 110 % del caudal nominal como se puede ver en la Figura 2.

2.3. Turbina Pelton

Las turbinas Pelton son las únicas turbinas hidráulicas de acción que se construyen en la actualidad para grandes potencias y empezaron a utilizarse en el año 1889. Son de admisión parcial, es decir, pocos álabes están activos simultáneamente, [Figura 7](#).

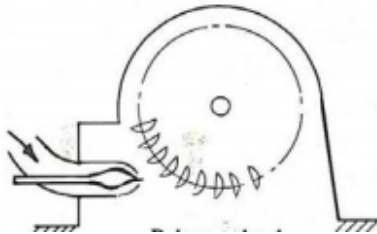


Figura 7: Dibujo turbina Pelton (Viedma y Zamora, 2008)

El distribuidor de la turbina Pelton se llama inyector, [Figura 8](#), y consta esencialmente de una tobera y una válvula de aguja. En la tobera se acelera el agua y se transforma prácticamente toda la energía potencial del agua en energía cinética del chorro. La potencia se regula mediante una válvula de aguja que se desplaza entre dos posiciones límite, mediante un servomotor. El chorro entra en los álabes del rodete, que denominaremos cucharas, a presión atmosférica y cede su energía de tal manera que a la salida la velocidad es mínima. Para evitar las salpicaduras el rodete está alojado en una caja o carcasa. El tamaño y el número de cucharas dependen de las características de la instalación.

Cuando hay una disminución de la carga en la central, hay que actuar sobre el caudal más rápidamente de lo que interesa a efectos de golpe de ariete. Cada inyector lleva incorporado un deflector que intercepta inmediatamente el chorro, parcial o totalmente, mientras la aguja, que se mueve más lentamente, ocupa la posición de la nueva carga.

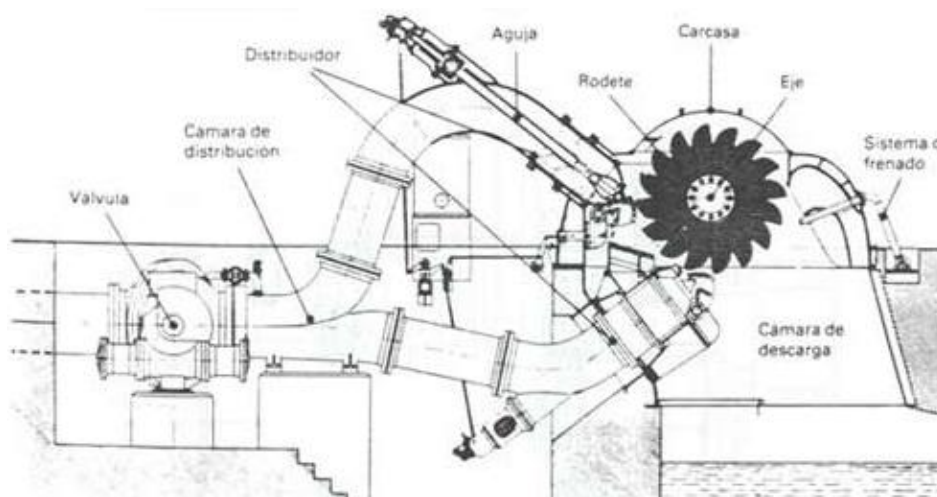


Figura 8: Esquema y partes de una turbina Pelton

Las ventajas de las turbinas Pelton son:

- Son robustas y las reparaciones son sencillas.
- Hay menos peligro de que los álabes sufran erosión
- La regulación de la presión y la velocidad es más fácil.

- Al girar con alta velocidad se puede conectar el generador de forma directa y evitar las pérdidas de transmisión mecánica.
- Como se puede ver en la [Figura 2](#), la curva de rendimiento es plana, obteniéndose buen rendimiento para las distintas cargas.

Las turbinas Pelton son adecuadas para grandes saltos y pequeños caudales, con lo que resultan potencias relativamente bajas. Las velocidades específicas son pequeñas y pueden variar entre 10 y 30 con un único inyector y hasta 75 con seis inyectores.

2.4. Turbina Turgo

La turbina Turgo apareció en el año 1920 y es una turbina de acción axial que consiste en un disco, con un gran número de álabes elipsoidales, [Figura 9](#), sobre los que incide un chorro procedente de una tobera. Estas turbinas son parecidas a las Pelton y tienen menor aplicación.



Figura 9: Turbina Turgo

Son adecuadas para centrales minihidráulicas, aunque necesitan que el agua no este sucia. Funcionan en el rango de valores donde se solapan las turbinas Pelton y Francis.

Las ventajas de esta turbina frente a otras son:

- El rodete es más barato que para una Pelton
- Tiene una velocidad específica más elevada y permite una menor coste del generador

2.5. Turbina Banki

La turbina Banki fue inventada en 1859 y también es conocida con los nombres de Ossberger o de flujo cruzado. En ella el salto se realiza en dos etapas y el chorro pasa de fuera hacia dentro, y después de haber pasado por el interior del rodete, desde dentro hacia fuera. Este tipo de turbinas de régimen lento son adecuadas para saltos pequeños y medianos (2,5 a 200 m), caudales pequeños (entre 0,04 y 13 m³/s) y potencias inferiores a 3 MW.

Las ventajas son:

- Es simple y robusta
- Rodete de limpieza automática gracias al sentido de circulación
- Se regula muy bien y es adecuada para aprovechamiento de caudales sometidos a fuertes variaciones, para conseguir un rendimiento óptimo, como se puede ver en la Figura 10.
- Para potencias pequeñas el rendimiento es aproximadamente del 80% para todo el rango del trabajo. Para potencias superiores el rendimiento llega hasta el 86%.

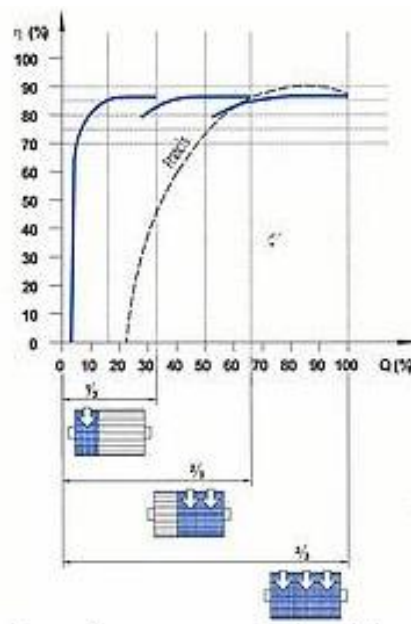


Figura 10: Rendimiento en el rango de trabajo de una turbina Banki. (Ossberger, 2014)



3. Análisis de la situación energética en Haití

1. Situación general

La República de Haití ocupa un tercio de la superficie de la isla de La Española, una de las más grandes del Caribe, cubre un territorio de 27750 km² y alberga una población aproximada de 10 millones de habitantes (PNUE, 2010). La capital del país, Puerto Príncipe, incluye siete municipios y acoge a más del 25% de la población de Haití. El país cuenta con diez departamentos que aparecen en la [Figura 11](#) con sus capitales:



Figura 11: Organización de la República de Haití (PNUE, 2010)

1.1. Historia

En 1804 se produjo la revolución haitiana, la primera rebelión exitosa de esclavos en el mundo moderno y estableció la República de Haití como la primera república de negros libres en el mundo. Durante los primeros años hubo problemas que obstaculizaron el progreso del país.

Los siguientes gobiernos hicieron todo lo posible para volver a mantener relaciones con Francia y aceptaron pagarles una gran cantidad de dinero. Por lo tanto, Haití tuvo que pedir prestado a los bancos franceses y llevar a cabo una explotación intensiva de sus recursos naturales, y la producción y venta de los productos básicos, creando grandes problemas económicos.

El país experimentó un período de relativa estabilidad bajo el gobierno de Jean-Pierre Boyer, que en 1822 emprendió la unificación de la isla y procedió a una ocupación militar de la República Dominicana durante 22 años. Tras numerosas luchas por la conquista, las fuerzas armadas de los Estados Unidos de América invadieron el país e inició una ocupación que duró 19 años.

El año 1986 marcó un cambio profundo en la trayectoria política y social del país, poniendo fin a casi 30 años de gobierno autoritario. En 1987 se aprobó la Constitución pero su

vigencia ha sido suspendida tras dos golpes de estado, el primero en 1991 y otro en 2004, en el que tuvo que intervenir Naciones Unidas y convocar unas elecciones democráticas.

El 12 de Enero de 2010, un terremoto devastó el país, matando a más de 222.000 personas y dejó a casi 2,3 millones de personas sin hogar. En octubre del mismo año, aparecen los primeros casos de cólera y la epidemia se va extendiendo rápidamente, dejando más de 3.500 muertos y 150.000 enfermos al final de 2010. Además a finales de ese mismo año el huracán Tomas llega a Haití, barriendo partes del país con lluvias torrenciales y vientos de hasta 130 km/h. En los primeros meses después del terremoto aparece la respuesta humanitaria internacional y las Naciones Unidas trabajan para apoyar los distintos ministerios y departamentos para hacer frente a los retos y rehabilitaciones humanitarias.

1.2. Clima

El país tiene un clima tropical con una temperatura promedio anual de 25 °C. La precipitación media anual es aproximadamente 1400 mm, sin embargo, debido a su terreno accidentado tiene muchos contrastes, algunas regiones superan los 4000 mm mientras que otras no llegan a los 350 mm en el mismo periodo. El país dispone de dos estaciones lluviosas y secas, la primera se extiende de Marzo a Mayo y de Agosto a Octubre y la segunda de Noviembre a Febrero y de Junio a Julio (PNUE, 2010)

Debido a las características de su relieve, Haití no tiene grandes sistemas fluviales. La principal arteria fluvial del país, Artibonite, nace en la República Dominicana y dos terceras partes de su curso entrecruzan el departamento del mismo nombre en Haití. El Artibonite, a pesar de tener un curso estacional e irregular, sigue siendo de los ríos más importantes de la cuenca del Caribe.

Los principales ríos del país aparecen en la [Tabla 2](#):

RÍO	CAUDAL MÁXIMO (m3/s)	CAUDAL MÍNIMO (m3/s)	CAUDAL PROMEDIO (m3/s)	LONGITUD (km)
Artibonite	2500	8,4	100	280
Trois Rivières	1500	0,3	6,5	110
Estère	95,3	1,85	3,1	46
Grande Rivière du Nord	390	0,02	5,4	57
Grande-Anse	850	0,7	12	88
Cavaillon	1035	0,7	8	49
Momance	420	0,6	6,4	35
Limbé	485	0,3	5,6	37
Rivière Grise	475	0,31	3,3	35
Jacmel	800	0,12	4,7	

Tabla 2: Información de los principales ríos de Haití. (PNUE, 2010). (MDE, 2001)

Haití ha sufrido durante los últimos años una sobreexplotación de los recursos iniciada en el siglo XIX para pagar deudas y ha continuado durante años porque se ha convertido en la

principal fuente de energía de la población. En la actualidad consta de sabana, bosques abiertos y restos de bosques cerrados, compuestos por árboles caducifolios y coníferos.

En el país hay grandes riesgos de desastres naturales como huracanes, terremotos, maremotos, sequías e inundaciones debido a su topografía.

1.3. Demografía

La población de Haití ha experimentado en las últimas décadas un impresionante crecimiento hasta llegar a los 10 millones de habitantes en 2010. La densidad en las ciudades cada vez es más alta, llegando a 350 habitantes por kilómetro cuadrado.

La población de Haití tiene una alta proporción de jóvenes, más de la mitad de la población es menor de 20 años y sólo el 5,1% de las personas superan los 65 años. Integrado principalmente por jóvenes, esta población podría ser un factor positivo para el futuro del país. Sin embargo, el crecimiento descontrolado de la población es preocupante si sólo la mitad de la población activa tiene un empleo (PNUE, 2010).

Aproximadamente dos tercios de la población viven en tres de los diez departamentos del país, distribuidos de la siguiente manera: 37% en el departamento del Oeste (la capital y sus suburbios), 16% en el Artibonite y el 10% en el Norte.

La tasa anual de crecimiento de la población (2,5%), es alarmante y según las proyecciones, el crecimiento continuará con la misma tendencia en los próximos años. Este aumento se explica por la falta de educación de la población sobre el control de natalidad, y la falta de acceso de la población en edad reproductiva a la anticoncepción y la planificación familiar.

Según el Ministerio de Salud la situación de salud de la población haitiana se caracteriza esencialmente por su precariedad. Las enfermedades infecciosas como el sarampión, el tétanos, el cólera, la difteria y el SIDA se encuentran entre las principales causas de mortalidad. También es importante destacar que la desnutrición está entre las 10 principales causas de muerte en el país.

1.4. Economía

Haití es el único país del continente americano que aparece en la lista de países menos desarrollados, con un índice de desarrollo humano 0,462 ocupa el puesto 168 de 187 países.

La economía de Haití, durante los últimos 20 años, pasa por un período difícil y el país se enfrenta a una grave crisis política. El PIB se redujo desde el primer semestre de 1990, en gran parte por la inestabilidad socio-política en el país. Después del terremoto el crecimiento económico se reanudó, en el año 2012 hubo un aumento del 2,8% del PIB, debido a la ayuda internacional.

El crecimiento demográfico en Haití ha causado la explotación intensiva del entorno natural, lo que provoca el agotamiento y pérdida del suelo, acelerando los mecanismos de erosión. Debido a la falta tanto de medios de producción y de canales de comercialización eficaces, la producción agrícola es muy baja. La mayoría de las explotaciones son de tamaño pequeño y orientado a la subsistencia de la familia. En las más grandes se cultivan productos para la exportación como: café, mango, cacao, tabaco, coco o algodón.

Actualmente, la minería se reduce esencialmente a la extracción de materiales de construcción en canteras, una explotación no sujeta al control fiscal del Estado haitiano.

La industrialización comenzó en la década de 1960 se mantuvo en un estado embrionario, con la fabricación de piezas electrónicas, textiles y bebidas. El inicio de la industrialización se redujo considerablemente por el embargo comercial impuesto a Haití por las Naciones Unidas entre 1992 y 1994, una situación que el país sigue sufriendo las consecuencias. El sector industrial empleó a 430.000 personas en el año 1991, había más de 13.000 en 1995 y no más de 25.000 en 2005.

El tejido se considera la columna vertebral de la industria de Haití y ha mostrado un rápido crecimiento. La HOPE (Haiti Hemispheric Opportunity Through Partnership Encouragement), aprobada en 2007 por el Congreso de los Estados Unidos de América, ha ayudado a Haití para iniciar un proceso de exportación a los Estados Unidos de productos textiles. La ley fue renovada en 2008 por un período de 10 años, lo que permitirá a Haití continuar con el procesamiento y la exportación de estos productos a Estados Unidos.

El sector terciario ha experimentado un renacimiento en el país y los créditos bancarios están desplazándose a este sector. Las actividades comerciales, la ayuda internacional, las remesas de los haitianos que viven en el extranjero y el gasto público son todos factores que han promovido la vitalidad de la banca, las comunicaciones y el transporte.

En cuanto a la distribución del PIB por actividades económicas, el sector de servicios supone el 45% en el PIB total (incluyendo 2% de la energía), seguido de la agricultura y la minería con un 24% y la construcción con un 21%. El sector industrial representa sólo el 10% del PIB (MTPTC, 2006).

1.5. Energía

En Haití la cobertura del servicio de electricidad es una de las más bajas en el mundo, menos de un millón de personas de un total de 8,5 millones de habitantes tiene acceso a servicios de electricidad de forma regular, lo cual representa una cobertura de sólo el 10%, si se tienen en cuenta las conexiones ilegales la cobertura asciende al 25 %. El servicio solamente está disponible un promedio de 5 a 8 horas diarias. (Gómez, J.R., Trujillo, C. et al., 2011). Además el terremoto que hubo en Enero de 2010 causó graves daños en la estructura eléctrica.

El sector eléctrico de Haití es principalmente atendido en todas sus etapas de generación, transmisión, distribución y comercialización por la empresa estatal Electricidad de Haití (EDH). La empresa EDH fue creada en 1971, es un organismo autónomo del Gobierno de Haití, que tiene por objeto la planeación, operación y el suministro del servicio público de la electricidad en el país. El Ministerio de Trabajos Públicos Transportes y Telecomunicaciones (MTPTC) es el encargado de definir las políticas y regular el sector.

Las redes existentes suministran principalmente energía a las principales ciudades, como Puerto Príncipe (75% de la capacidad instalada) y Jacmel, mientras que en las zonas rurales sólo cuentan con biomasa. La red de distribución de electricidad consta de unos 900 kilómetros de líneas de red primaria y 1200 km de la red secundaria.

El precio de la electricidad se sitúa entre los más altos del mundo y los índices de electrificación son bajos.

En Haití la energía local satisface el 80% de la demanda nacional gracias a la biomasa doméstica y algunas centrales hidroeléctricas instaladas. El país se enfrenta a una grave crisis energética caracterizada por: la carga para la economía de la importación de combustibles derivados del petróleo, un consumo per cápita muy bajo y una alta intensidad energética, el insuficiente desarrollo del sector industrial con un bajo consumo frente al residencial, el uso excesivo de la biomasa que conduce a altos niveles de erosión y deforestación, el aumento de la población y la disminución del Producto Interior Bruto per cápita (MTPTC, 2006). La madera es la principal fuente de energía en los sectores residencial e industrial.

La capacidad total instalada del sistema eléctrico de Haití es de 300 MW, de los cuales el 80% se producen en centrales alimentadas por diésel. Los productores de energía independiente proporcionan electricidad a EDH con una capacidad disponible de 76 MW procedentes de generadores diésel o de gasolina. El país cuenta con 23 centrales térmicas y 7 centrales hidroeléctricas pequeñas.

El bajo desarrollo también se refleja en el sector energético, con un consumo per cápita realmente bajo, 25 kWh (BM, 2014), y con el problema agregado de que en el país existen pocos recursos para la producción de electricidad y todos los productos derivados del petróleo son importados. Por estas razones Haití posee los valores más bajos de acceso a la electricidad de la región, entorno al 30%.

2. Energía para el subdesarrollo

La Declaración Universal de los Derechos Humanos de 1948 establece una serie de derechos para tener un nivel de vida digno que son imposibles de conseguir sin el acceso adecuado a los servicios energéticos. Los derechos incluyen: la alimentación, el vestido, la vivienda, la asistencia médica y los servicios sociales necesarios, el derecho al trabajo en condiciones equitativas y satisfactorias, y el derecho a la educación. Actualmente hay cerca de 1500 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a las formas modernas de la energía y las zonas del mundo donde viven coinciden con los lugares donde hay mayor pobreza.

En Septiembre de 2000, en la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas (ONU), se crearon los ocho objetivos de desarrollo del Milenio (ODM) con el fin de combatir la pobreza, el hambre, las enfermedades, el analfabetismo, la degradación del ambiente y la discriminación contra la mujer. En ellos no se contempla explícitamente la necesidad de proporcionar a todos acceso a las formas modernas de energía. Sin embargo, la energía es un requisito imprescindible para la realización de los planes y proyectos que permitirán conseguir los ODM (ESF, 2010).

Disponer de energía sostenible y eficiente es muy importante para el desarrollo humano, social y económico de un país como Haití, que se encuentra entre los países menos desarrollados del mundo. La electricidad es la forma de energía que proporciona más servicios y un aumento de la misma supone: poder tener iluminación en las viviendas para aprovechar mayor número de horas en el día y tener mayores servicios en las mismas, conservar las medicinas y aumentar la industria. Hasta el momento ningún país ha reducido sustancialmente la pobreza sin un aumento masivo del uso de la energía o sin un cambio a fuentes energéticas eficientes.

2.1. Descripción de los indicadores utilizados

Para realizar un análisis de la situación energética de Haití se han elegido una serie de indicadores que ayudan a explicarla. Los textos utilizados para este análisis son: EIA 2013, BID 2010, IFC 2012, ESF 2010, Pérez-Foguet, A et al. 2006.

- **Índice de desarrollo humano (IDH):** es un indicador social compuesto por tres parámetros: vida larga y saludable, educación y nivel de vida digna. Cada uno de los parámetros está relacionado con un indicador: la vida larga con la esperanza de vida al nacer, la educación con la tasa de alfabetización en adultos y la tasa bruta de matriculación, y el nivel de vida con PIB per cápita. Estas relaciones aparecen en el esquema de la [Figura 12](#).



Figura 12: Parámetros que intervienen en el IDH

Según el Programa de Las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, 2014), se diferencia entre IDH muy alto, alto, medio y bajo según lo expuesto en la [Tabla 3](#).

PAÍS	IDH
Desarrollo humano muy alto	0.885
Desarrollo humano alto	0.723
Desarrollo humano medio	0.601
Desarrollo humano bajo	0.479

Tabla 3: Clasificación de los países según IDH. (UNDP, 2014)

- **Producto interior bruto (PIB):** es la suma del valor agregado por todos los productores residentes en la economía más todo impuesto a los productos, menos todo subsidio no incluido en el valor de los productos brutos. Se calcula sin hacer deducciones por depreciación de bienes manufacturados o por agotamiento y degradación de recursos naturales. Los datos se expresan en dólares de los Estados Unidos a precios constantes del año 2005. Las cifras en dólares del PIB se obtuvieron convirtiendo los valores en monedas locales utilizando los tipos de cambio oficiales del año 2005.
- **Producto interior bruto (PPA) per cápita:** es el producto interior bruto dividido por la población a mitad de año. También se mide en: US\$ a precios constantes de 2005.

Para el caso del PIB per cápita también se diferencia entre IDH muy alto, alto, medio y bajo según la [Tabla 4](#):

PAÍS	PIB per cápita (US\$ precios constantes de 2005)
Desarrollo humano muy alto	39129
Desarrollo humano alto	11764
Desarrollo humano medio	5418
Desarrollo humano bajo	2716

Tabla 4: Clasificación de los países según PIB per cápita. (UNDP, 2014)

- **Combustibles renovables y residuos:** constituidos por: biomasa sólida, biomasa líquida, biogás, residuos industriales y residuos urbanos. Se mide como porcentaje del consumo total de la energía.
- **Pérdidas de transmisión y distribución eléctrica:** son las pérdidas en la transmisión de electricidad entre las fuentes de suministro, los puntos de distribución y los consumidores. Están incluidas las pérdidas debidas al hurto. Se mide como porcentaje de la producción total.
- **Uso de la energía:** es el consumo de energía antes de la transformación. Se calcula sumando las importaciones a la producción nacional, y restando las exportaciones y los combustibles suministrados a barcos y aviones que circulan a nivel internacional. La unidad que se usa es kilogramo equivalente de petróleo per cápita.
- **Consumo energético:** es la producción de energía debida al: petróleo, gas natural, combustibles sólidos (carbón, lignito y derivados), combustibles renovables y residuos. Se miden en kilogramos equivalentes de petróleo.
- **Consumo de energía eléctrica per cápita:** es la producción de las centrales eléctricas y de las plantas de cogeneración menos las pérdidas de transmisión, transformación y distribución eléctrica. También se resta el consumo de las propias plantas. Se mide en kilovatios-hora.
- **Intensidad energética:** es un indicador de la eficiencia energética de una economía y se calcula como la relación entre el consumo energético y el producto interior bruto. La intensidad energética es el valor medio de la cantidad de energía necesaria para generar una unidad de riqueza. Esto justifica que una evolución decreciente de este indicador tenga como consecuencia un consumo medio menor de energía para generar una unidad de riqueza, y se puede interpretar como un incremento de la eficiencia energética. Pero hay una gran variedad de factores que pueden influir en la evolución de este índice: la estructura industrial del país, su nivel de equipamiento, la evolución económica, la disponibilidad de recursos autóctonos, la situación geográfica, etc.

2.2. Valores de los indicadores para Haití

En los siguientes apartados se va a hacer un análisis de la situación de Haití basándose en los indicadores anteriormente descritos y viendo la situación que ocupa respecto a otros países. En la [Tabla 5](#) aparecen los datos proporcionados por el Ministerio (MTPTC, 2006) y los obtenidos del Banco Mundial para el año 2010 (BM, 2014).

	Ministerio Haití (MTPTC, 2006)	Banco Mundial (BM, 2014)
IDH	0,462	0,462
PIB per cápita (US\$ precios constantes de 2005)	488,6	436
Consumo per cápita (Kwh)	84	25
Uso de la energía (kg equivalente de petróleo per cápita)	230	228,98
Energía renovable y residuos (%)	75	69,84
Pérdidas (%)	53,59	58,43
PIB (US\$ precios constantes de 2005)	4,21E+09	4,31E+09
Consumo energético (MJ)	7,06E+10	7,26E+10
Intensidad energética (ktoe/US\$)	22,80	16,83

Tabla 5: Datos de los indicadores para Haití

Haití se encuentra en el puesto 162 respecto al IDH (UNDP, 2014). Según la [Tabla 3](#) y la [Tabla 4](#), que muestran la clasificación según el IDH y el PIB per cápita, Haití tiene un desarrollo humano bajo.

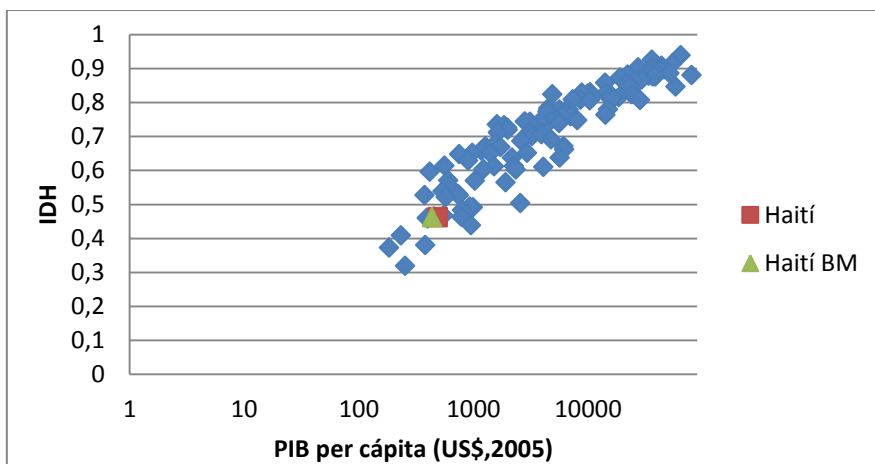
2.3. Representación y análisis de la situación de Haití

A continuación se va a analizar la situación de subdesarrollo de Haití desde un punto de vista energético a partir de los datos de los indicadores anteriormente mostrados. En las gráficas siguientes los datos obtenidos del Ministerio Haití se representan con un cuadrado de color granate, mientras que los resultados obtenidos del Banco Mundial se representan con un triángulo verde.

En color azul aparecen representados el resto de países (BM, 2014) para el mismo periodo y se puede observar su tendencia. Hay países que no aparecen porque no se conocen los datos de los indicadores.

2.3.1. Producto interior bruto per cápita e índice de desarrollo humano

En la **Gráfica 1** se representa en el eje de abscisas el PIB per cápita en dólares a precios constantes de 2005 y en el eje de ordenadas el IDH. Para el PIB per cápita se usa escala logarítmica porque los datos abarcan un gran rango de valores y así se pueden visualizar mejor los países con menor PIB y ver mejor la situación que ocupa Haití entre ellos:



Gráfica 1: IDH frente al PIB per cápita

Se puede ver la relación del PIB per cápita con el desarrollo humano, siendo evidente la situación de pobreza y de bajo desarrollo que vive Haití. El país es el más pobre y menos desarrollado de América Latina y el Caribe y uno de los que ocupa los últimos lugares a nivel mundial.

2.3.2. Índice de desarrollo humano y uso de la energía

En la **Gráfica 2**, en el eje de ordenadas, aparece el uso de la energía en kilogramos equivalentes de petróleo per cápita frente al IDH. Para el uso de la energía se usa escala logarítmica. En esta gráfica se ve una clara tendencia y como los países con menor IDH tienen un uso de la energía menor. Como se ha comentado antes es necesario un aumento del uso de la energía para aumentar el desarrollo.

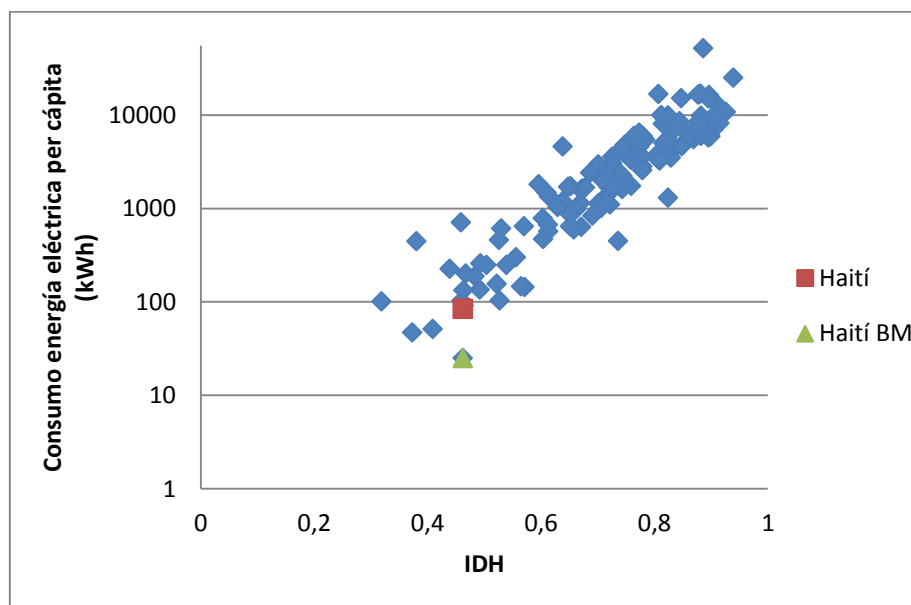


Gráfica 2: Uso de la energía frente al IDH

2.3.3. Índice de desarrollo humano y consumo per cápita

En la Gráfica 3 se representa el consumo de la energía eléctrica per cápita, en kWh, usando la escala logarítmica, frente al IDH. Hay diferencias significativas entre los datos aportados por el Banco Mundial y los de Ministerio. Teniendo en cuenta los primeros, Haití tiene el menor consumo de los países de los que se poseen datos.

La energía es un componente necesario para la realización de un proyecto que tenga como objetivo reducir la pobreza y mejorar el desarrollo humano de un país. Para la electricidad existe una relación entre el acceso a las formas modernas de energía y la mejora del desarrollo. Las formas modernas de energía no incluyen la madera como combustible. En la gráfica se puede apreciar la relación existente.



Gráfica 3: Consumo de energía eléctrica per cápita frente IDH

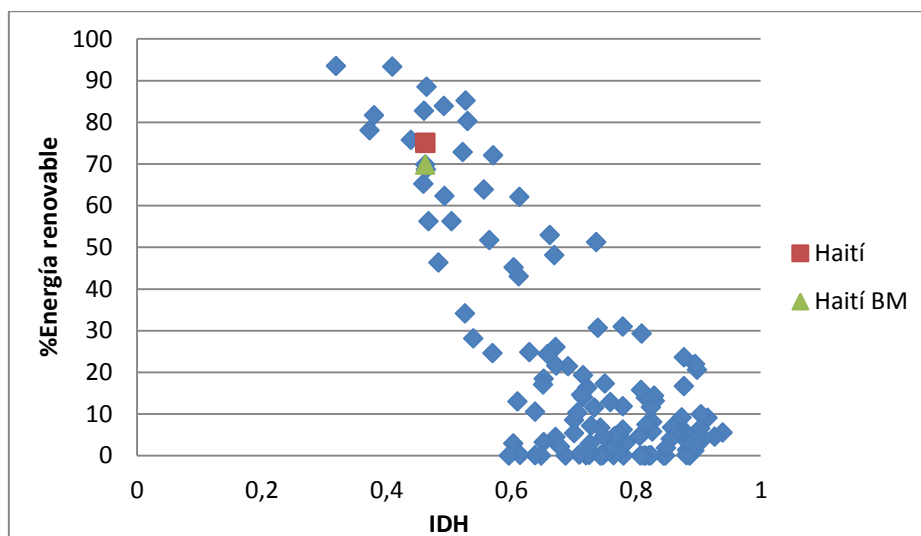
Según datos del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, 2010), actualmente carecen de acceso a la electricidad 1400 millones de personas y 3000 millones tienen que usar biomasa y carbón para cubrir las necesidades básicas. Así mismo se estima en dos millones las muertes anuales derivadas de las malas condiciones de combustión y ventilación.

El PNUD sitúa en 1.200 kWh/año el umbral de consumo de electricidad necesario para poder satisfacer las necesidades básicas, lo cual contribuiría, desde el punto de vista de los derechos humanos, a garantizar las bases de una vida digna, larga y saludable. Este umbral variaría según el país de estudio.

Haití se encuentra muy por debajo de este valor y se encuentra lejos de otros países de América Latina y el Caribe. Este valor implica que hay una gran parte de la población que no tiene acceso a ningún servicio dentro del hogar, ni siquiera a la iluminación.

2.3.4. Índice de desarrollo humano y porcentaje de energía renovable

En la **Gráfica 4** aparece representado el porcentaje de energía renovable y el IDH. Dentro de energías renovables también se incluye el carbón, la leña y los residuos. Esto explica que Haití tenga un porcentaje tan alto y que países con mayor IDH tengan un menor porcentaje, porque aunque tienen un mayor desarrollo de las energías renovables, el porcentaje es pequeño frente a otras fuentes utilizadas en estos países.



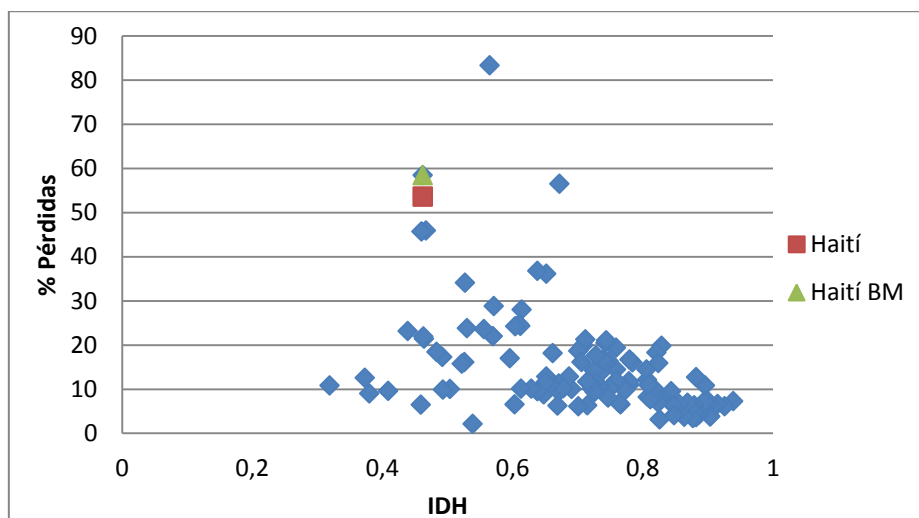
Gráfica 4: Porcentaje de energía renovable frente al IDH

La actual situación energética de muchos países en desarrollo, especialmente de los más pobres, se basa en el predominio del uso de la biomasa. En la medida en que este recurso no se repone en la misma proporción en que se usa, la situación no será viable en el futuro, tanto por la escasez del combustible, como por los efectos perjudiciales sobre el medio ambiente y la biodiversidad. La desaparición de la capa vegetal hace desaparecer también la capacidad de retención del CO₂ de la atmosfera, aumentando los efectos del cambio climático. Y ello sin contar con los efectos perjudiciales para la salud que provoca una mala combustión de la biomasa en las viviendas.

En países como Haití hay que luchar contra el uso excesivo de la madera como combustible y es importante apostar por energías renovables como la energía hidráulica para preservar el medioambiente. También se podría buscar otra manera más eficiente de consumirla para su mejor aprovechamiento.

2.3.5. Índice de desarrollo humano y porcentaje de pérdidas

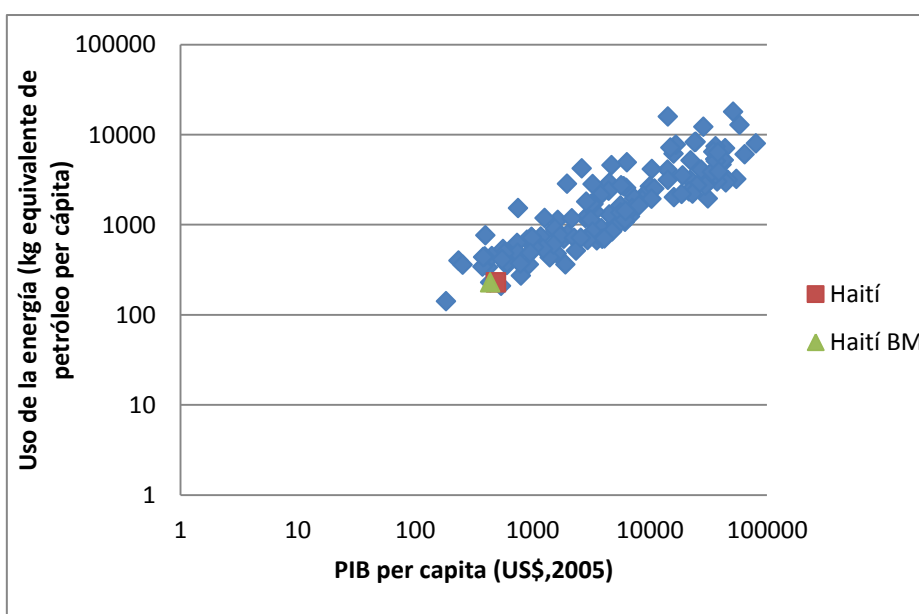
El porcentaje de pérdidas frente al IDH se representa en la [Gráfica 5](#). No ocurre como con otros indicadores que hay una clara tendencia, pero si se puede ver que los países con mayores pérdidas tienen un desarrollo bajo o medio. Haití es el segundo país en cuanto a pérdidas, sólo superado por la República del Congo, y son debidas a las pérdidas en transmisión por el envejecimiento de las redes y en mayor medida por las conexiones ilegales.



Gráfica 5: Porcentaje de pérdidas frente al IDH

2.3.6. Producto interior bruto per cápita y uso de la energía

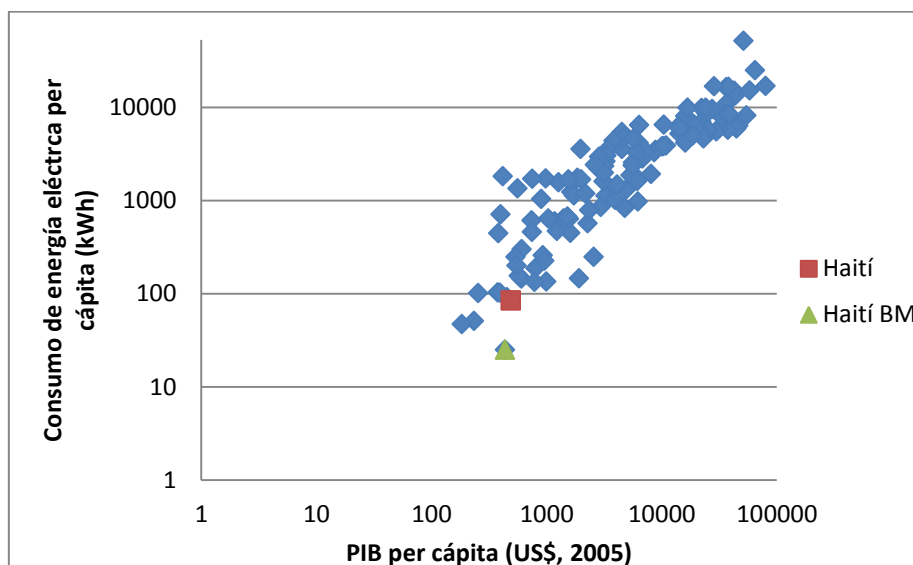
En la [Gráfica 6](#) se usa en los dos ejes una escala logarítmica que permite una mejor visualización de los datos. Hay una relación entre el PIB per cápita y el uso de la energía y se ve como Haití se encuentra en una posición precaria, por detrás de los otros países de la región por su bajo desarrollo económico. La energía es necesaria para la realización de un proyecto que tenga como objetivo reducir la pobreza.



Gráfica 6: Uso de la energía frente a PIB per cápita

2.3.7. Producto interior bruto per cápita y consumo per cápita

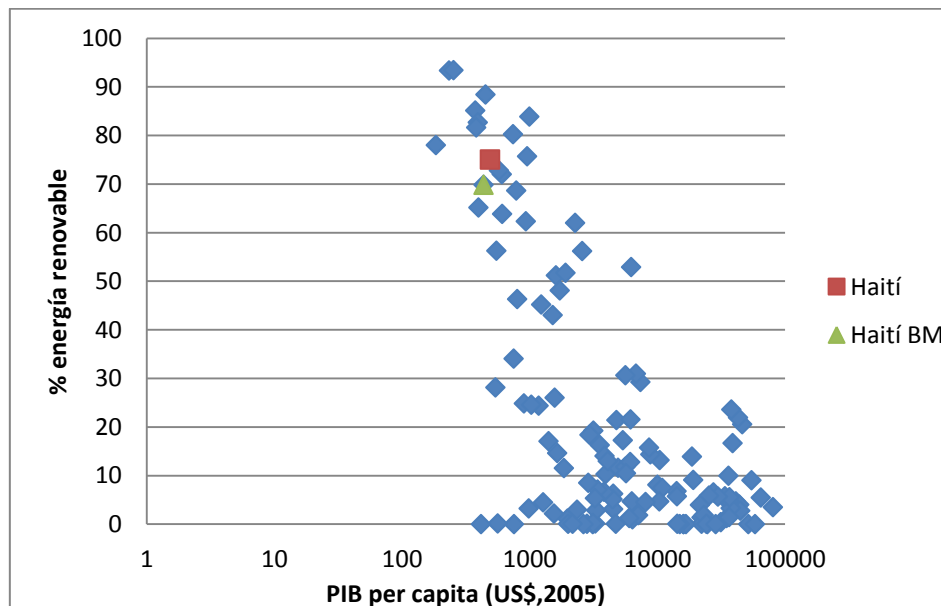
En la [Gráfica 7](#) se representa el consumo eléctrico y el PIB per cápita en escala logarítmica. Se aprecia la dependencia entre el consumo de energía eléctrica y el PIB, como pasaba con el IDH.



Gráfica 7: Consumo de energía eléctrica frente PIB per cápita

2.3.8. Producto interior bruto per cápita y porcentaje de energía renovable

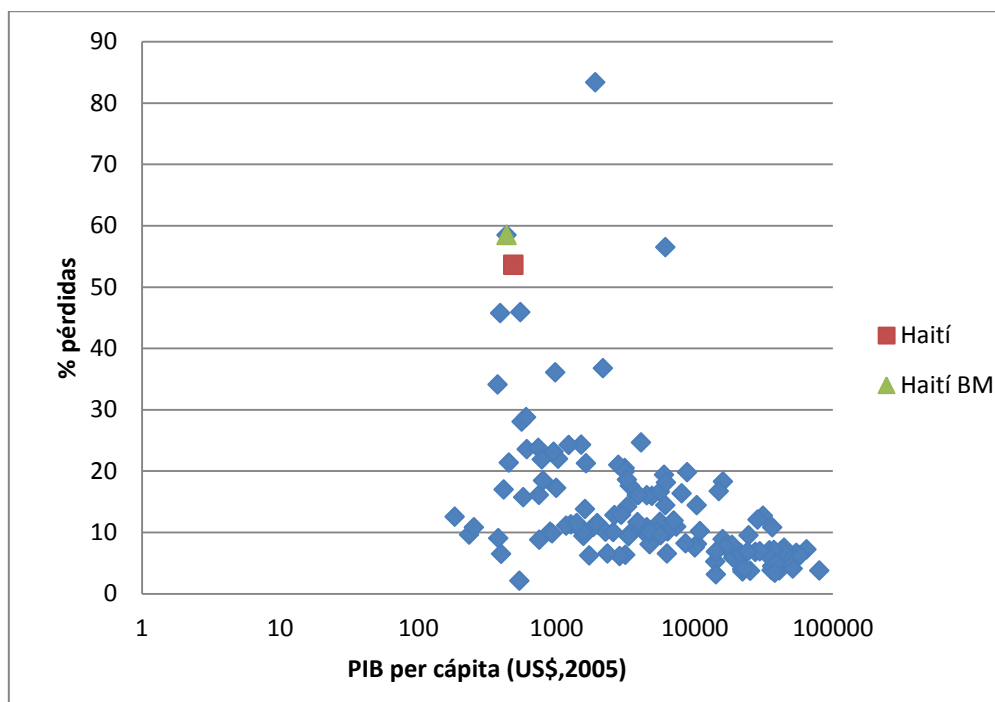
En la [Gráfica 8](#) se representa la energía renovable, incluyendo la madera, y el PIB per cápita en escala logarítmica.



Gráfica 8: Porcentaje de energía renovable frente al PIB per cápita

2.3.9. Producto interior bruto per cápita y porcentaje de pérdidas

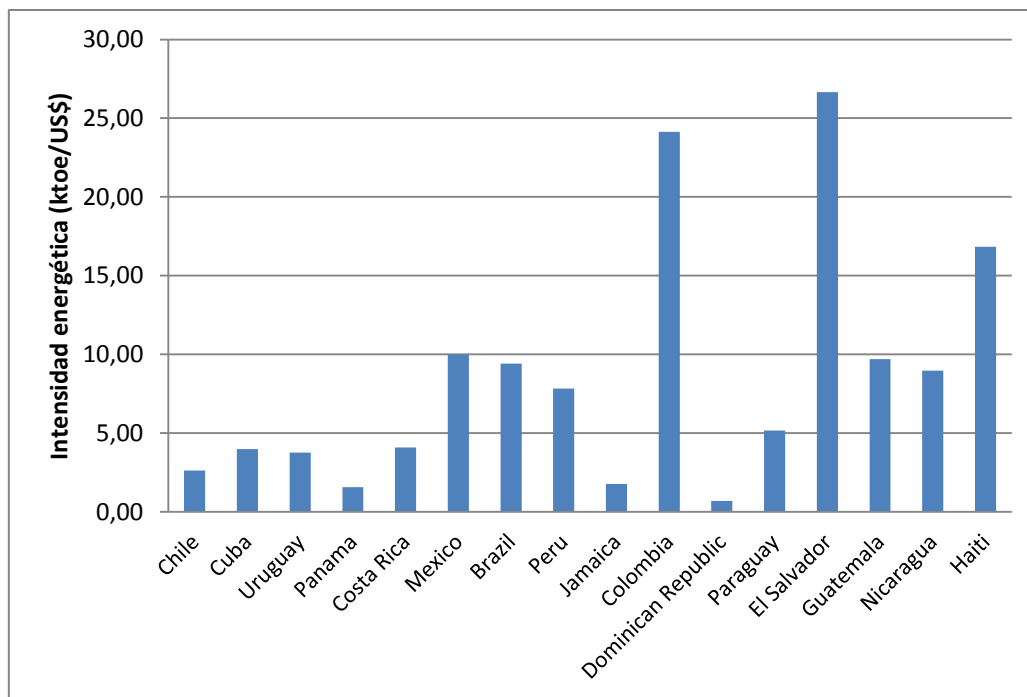
En la **Gráfica 9** aparecen las pérdidas en tanto por ciento frente al PIB per cápita en escala logarítmica. Como pasaba al representarlo frente al IDH, los países que tienen mayor porcentaje de pérdidas están entre los pocos desarrollados porque tienen las redes de transmisión y distribución en peor estado, y porque la gente se conecta ilegalmente por la pobreza.



Gráfica 9: Porcentaje de pérdidas frente al PIB per cápita

2.3.10. Intensidad energética de algunos países de Sudamérica

En la **Gráfica 10** se representa la intensidad energética de algunos países de Sudamérica y para poder compararlos con los resultados de Haití. La intensidad energética se usa como una medida de la eficiencia energética de un país. En la gráfica están dibujados los valores correspondientes a los datos del Banco Mundial (BM, 2014). El Ministerio proporciona para la intensidad energética un valor mayor, 22,8 ktoe/US\$. Una vez más se puede observar la variabilidad de los datos dependiendo de la fuente que se consulte, ya que hay una diferencia significativa entre ambas.



Gráfica 10: Intensidad energética para diferentes países

La intensidad energética es un indicador que tiene que ver con el uso eficiente de la energía, aunque también está relacionado con otros factores. En el caso de Haití la intensidad energética es mayor que la de la mayoría de los países de la región, a excepción de Colombia y El Salvador. Esto es debido principalmente a un bajo desarrollo económico y al gran uso de madera como fuente de energía en las viviendas. Los países que tienen una alta intensidad energética y un menor uso de madera suelen ser los que se dedican a la industria, mientras que los que tienen menor intensidad suelen ser aquellos con mayor participación en el sector servicios (BID, 2010).

3. Análisis energético

En 1971 se creó Electricidad de Haití (EDH) y se pusieron en marcha las unidades de la central hidroeléctrica de Peligre, que se convirtió en la principal fuente de energía eléctrica en la zona metropolitana de Puerto Príncipe. A partir del 1980, EDH empezó a instalar plantas de generación diésel para satisfacer el crecimiento de la demanda. Fue a partir de 1990 cuando comenzó a contratar el suministro de energía a Productores Independientes de Energía (IPP), por medio de contratos de compra (PPA) y la reparación y operación de sus plantas térmicas. En 2008 se instalaron tres nuevas plantas diésel, con una potencia total de 60 MW, basándose en un acuerdo entre los gobiernos de Venezuela, Cuba y Haití.

El área de Puerto Príncipe tiene aproximadamente el 28% de la población y el 75% de la demanda eléctrica del país, cuenta con un sistema de transmisión de 69 kV y la línea de 115 kV de la estación de Peligre. Hay cuatro pequeñas redes aisladas para suministrar energía a las ciudades de Cap Haitien, Gonaives / Saint Marc, Les Cayes y Jacmel, con líneas de distribución de 23 kV.

La capacidad total instalada del sistema eléctrico de Haití es aproximadamente 300 MW, aunque sólo cerca del 50% está disponible (BID, 2010). La baja disponibilidad está relacionada con un mantenimiento inadecuado y la falta de piezas de recambio en los generadores diésel. En la central de Peligre la baja disponibilidad es debido a problemas de sedimentación y por la necesidad de rehabilitar los equipos electromecánicos. Debido al mal servicio, su irregularidad y los altos costos, la mayoría de consumidores industriales y comerciales han tenido que instalar generadores diésel.

El país cuenta con 23 centrales térmicas y 7 centrales hidroeléctricas pequeñas. El 80% de la energía se produce en centrales alimentadas por diésel. En la [Tabla 6](#) aparece la capacidad instalada para las distintas regiones del país.

Región	Hidráulica (MW)		Térmica (MW)	
	Instalada	Disponibile	Instalada	Disponibile
Norte	0,8	0,5	19,9	11,2
Artibonite/Centre	4	2,3	31,8	13,8
Puerto Príncipe	54	13	165,2	112,8
Sur	2,9	1,8	20,5	9
TOTAL	61,7	17,6	237,4	146,8

Tabla 6: Capacidad térmica e hidráulica para las cuatro regiones BID, (2010)

La red eléctrica de Puerto Príncipe cuenta con 4 centrales térmicas grandes (Carrefour, Alexandre Petion, Varreux y E-Power) y la central hidroeléctrica de Peligre. Alrededor del 50% de la generación térmica en Puerto Príncipe está operada por dos 2 IPP, Sogener y E-Power, y otro contratista privado opera alrededor de 6 MW en Les Cayes. Las centrales más importantes de Puerto Príncipe son las de la [Tabla 7](#):

NOMBRE DE LA CENTRAL	TIPO DE CENTRAL	OPERADOR	POTENCIA INSTALADA (MW)	CAPACIDAD DISPONIBLE (MW)
Carrefour	Térmica	EDH	49,5	25
Varreux I	Térmica	Sogener	15	10
Varreux II	Térmica	Sogener	18,7	16,8
Varreux III	Térmica	Sogener	18	10
E-Power	Térmica	Epower	30	24
Alexandre Petion	Térmica	Venez/Haití	34	27
Peligre	Hidroeléctrica	EDH	54	13
		TOTAL	219,2	125,8

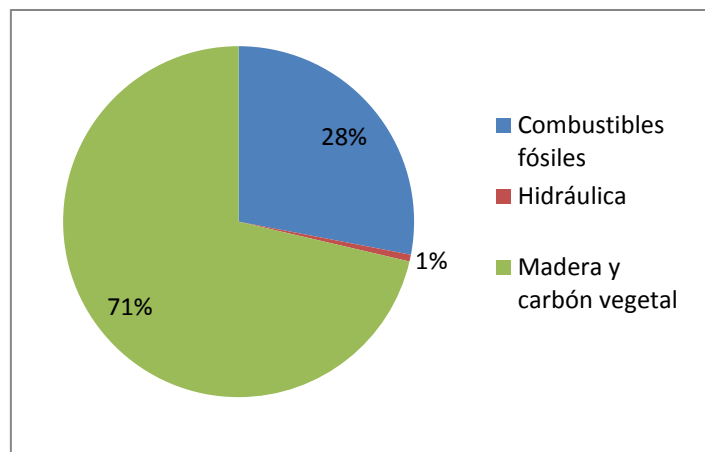
Tabla 7: Principales centrales en Haití. BID, (2010)

Las pérdidas eléctricas totales son muy altas, en la [Gráfica 5](#) y [Gráfica 9](#) se ve que es superior a la mayoría de los países. Las pérdidas técnicas por el mal estado de las redes de distribución se estiman en un 18%, mientras que las pérdidas comerciales supondrían aproximadamente un 35% (MTPTC, 2006). Estas últimas son debidas principalmente al hurto y a una cultura de no pagar la electricidad motivada por el mal servicio del EDH a los consumidores.

El índice de recuperación de efectivo (CRI) es muy bajo por las pérdidas y la recaudación de ingresos baja (BID, 2010). El EDH es financieramente insolvente, en el 2009 el CRI fue de 38% y los ingresos cubrían menos de la mitad de sus gastos administrativos y operativos. Además no se recolecta lo suficiente para cubrir la compra de energía a los productores independientes y pagar el combustible de sus plantas, esto hace que haya transferencias del tesoro público al sector eléctrico. Es el Ministerio de Finanzas (MEF) el encargado de pagar a los productores independientes, se estima que la cifra asciende a 100 millones de dólares al año.

Otro de los principales problemas a los que se enfrenta el sector energético de Haití es a la falta de un organismo encargado exclusivamente de la energía. Actualmente hay varios ministerios e instituciones encargados de este sector y esto es una de las razones por las cuales los datos aportados varían tanto. Además no hay una comunicación suficiente entre los distintos organismos.

Según los datos obtenidos de La Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2014) en Haití hay tres fuentes de energía: hidráulica, petróleo y biocombustibles. Tras analizar el balance para el año 2010 se concluye que de esa energía la mayor parte se obtiene de biocombustibles (71%), seguida por el petróleo (28%) y la hidráulica (1%), [Gráfica 11](#).



Gráfica 11: Reparto según las fuentes de energía

De la energía eléctrica el 30% proviene de centrales hidráulicas mientras que el 70% restante corresponde a centrales térmicas. El esquema de la distribución de la energía se representa en la [Figura 13](#) y se puede ver el reparto de la energía según las fuentes utilizadas y como se reparte entre los distintos sectores económicos:

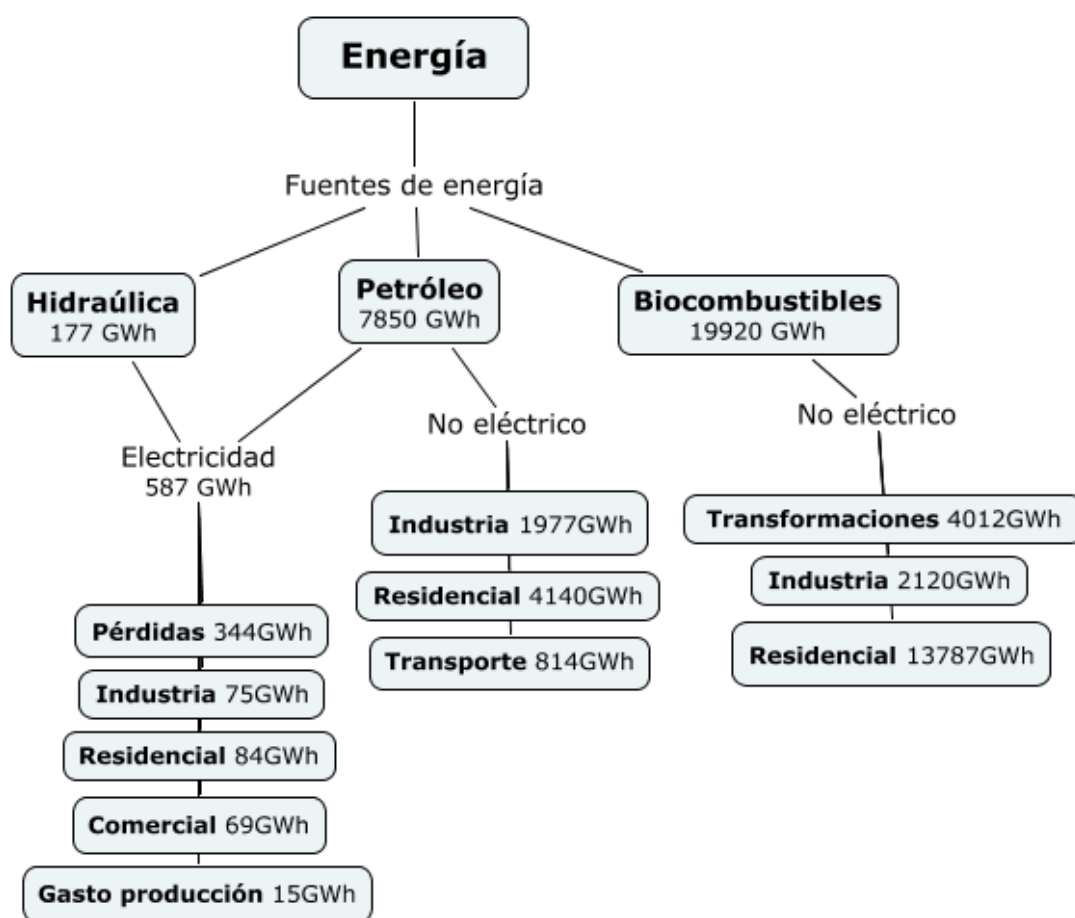
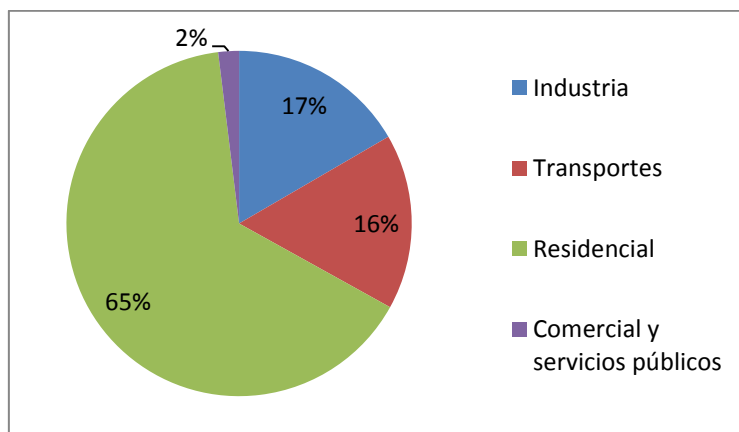


Figura 13: Fuentes de energía y reparto según los sectores. Datos: IEA

Es importante destacar que de la energía eléctrica producida sólo el 40% se consume, mientras que casi un 60% son pérdidas. Como se puede ver en la gráfica superior el mayor consumo es residencial y mayoritariamente proviene de biocombustibles. En la [Gráfica 12](#) se representa el reparto de la energía según los distintos sectores:

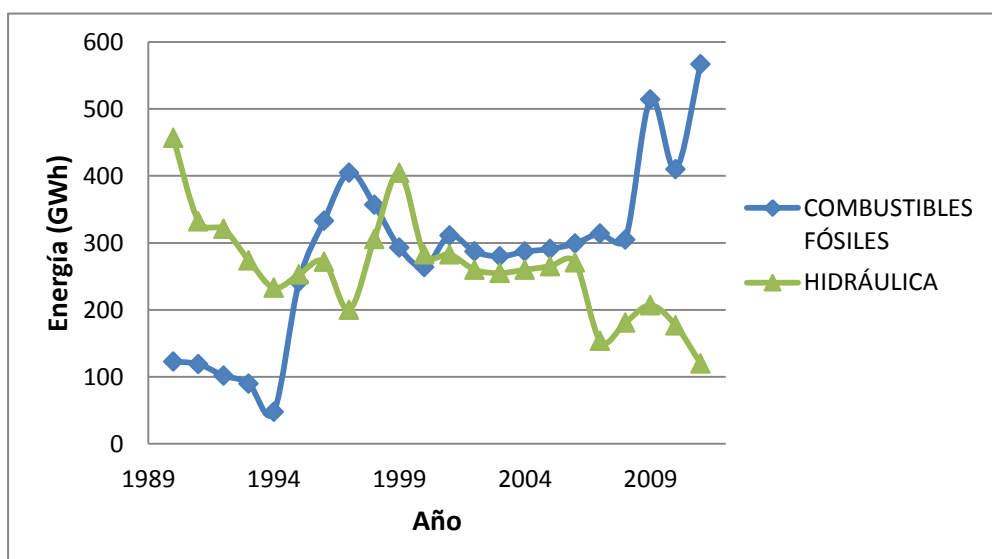


Gráfica 12: Reparto de la energía por sectores. Datos: IEA

Las dos fuentes principales de energía eléctrica son la hidráulica y el petróleo. El petróleo genera aproximadamente el 80 % de la energía eléctrica del país.

Anteriormente se ha comentado que el consumo per cápita de energía eléctrica en Haití es 25kWh. Si se tiene en cuenta que hay aproximadamente 6 personas por vivienda, cada hogar dispone de 150kWh de media. El consumo aproximado anual para los electrodomésticos básicos es: 380kWh para un frigorífico, 100kWh para iluminación, 90kWh para la televisión (MTPTC, 2006), lo que hace un total de 570kWh. Con los 150Kwh disponibles por hogar no se puede cubrir el consumo necesario para tener los electrodomésticos básicos.

Se puede observar como durante los últimos años la tendencia existente ha cambiado, se ha producido un aumento de la energía generada por medio de petróleo y ha disminuido la hidráulica, que hasta ese momento había sido la fuente principal de energía:



Gráfica 13: Energía eléctrica generada según la fuente. Datos: IEA

Además en el año 2011 también ha habido una pequeña parte de la producción que ha sido generada por biocombustibles (31GWh).

Para poder solucionar el problema energético de Haití se han hecho una serie de propuestas a medio y largo plazo por parte del Banco Interamericano de Desarrollo y del Ministerio de Trabajos Públicos, Transportes y Comunicación (MTPTC, 2006 y BID, 2010).

Los planes a corto plazo incluyen la mejora del desempeño comercial del EDH y la eliminación de las pérdidas. Se tiene que restaurar el sistema de generación, transmisión y distribución para poder ofrecer un servicio fiable y capaz de cubrir la demanda existente. Además hay que promover cocinas más eficientes e ir sustituyendo el uso de la leña y el carbón vegetal por combustibles líquidos.

Entre las propuestas a largo plazo se encuentra el desarrollo de energías renovables en el país que permitiría el acceso a electricidad en zonas rurales y reducir la dependencia de madera y de los combustibles fósiles importados.

La potencia solar instalada se estimó en 0,7 MW en 2006. Actualmente, para cubrir las necesidades básicas y tras el terremoto del año 2010, se han instalado generadores fotovoltaicos para la iluminación, las comunicaciones y contar con los servicios en los centros de emergencia. Este Programa de Emergencia está financiado por el Banco Mundial y el FMAM.

El potencial hidroeléctrico que no se ha desarrollado en Haití se estima en unos 153 MW, de los cuáles el 15% se trata de minihidráulica y el resto serían proyectos de tamaño medio. Actualmente se está construyendo la central hidroeléctrica de Artibonite 4C aguas abajo de Peligre (BID, 2010).

A continuación aparecen los datos referentes a la potencia hidráulica en Haití y a la energía generada gracias a esta fuente en el año 2011. En el capítulo siguiente se hará un análisis de estos datos y más concretamente de las centrales existentes en el país.

Según las fuentes consultadas se obtienen distintos valores para la capacidad hidroeléctrica instalada, [Tabla 8](#):

POTENCIA HIDROELÉCTRICA		
POTENCIA INSTALADA (MW)	POTENCIA DISPONIBLE (MW)	FUENTE
63	-	WEC, 2014
61,7	17,6	BID, 2010
54,88	-	BME, 2014
50	-	RF, 2014

Tabla 8: Potencia instalada

Lo mismo ocurre con la energía hidroeléctrica generada:

ENERGÍA GENERADA 2011	
ENERGÍA (GWh)	FUENTE
479	WEC, 2014
120	IEA, 2014

Tabla 9: Energía generada

También se aportan los datos de la potencia nominal y disponible de la central hidroeléctrica de Peligre, ya que es la principal fuente de energía en el país, según la fuente consultada como se ve en la [Tabla 10](#) :

POTENCIA HIDROELÉCTRICA DE PELIGRE			
POTENCIA NOMINAL	POTENCIA DISPONIBLE	% POTENCIA DISPONIBLE	FUENTE
54	13	24	BID, 2010
54	27	50	Antunes, 2010
54	10 30	18 - 56	Gómez, 2011
47,1			BME, 2014

Tabla 10: Potencia nominal y disponible en Peligre según la fuente

En el capítulo siguiente se va a hacer un análisis de los datos referentes a la energía hidráulica en Haití, que sirva como revisión bibliográfica y fuente para saber cuáles son los datos disponibles.



4. Energía hidráulica en Haití

1. Energía y potencia hidráulica

La energía hidráulica en Haití ha tenido mucha importancia desde que se instalaron las turbinas de la central hidroeléctrica de Peligre en 1971. En ese momento era la principal fuente de energía eléctrica del país y se encargaba de suministrar electricidad a la capital Puerto Príncipe. Con los años, se construyeron pequeñas centrales hidroeléctricas en el país, que permitían el suministro de energía a poblaciones más pequeñas y se crearon líneas de transmisión.

En los últimos años la energía hidráulica ha ido perdiendo importancia en el país, mientras que la generada por medio de combustibles fósiles ha ido aumentando, como se puede ver en la [Gráfica 13](#). Este aumento se debe principalmente al deterioro de las centrales hidroeléctricas, las cuáles necesitan ser rehabilitadas y tener el personal necesario para garantizar el buen mantenimiento de las mismas. Además la población en Haití ha ido aumentando y la demanda de electricidad también lo ha hecho, de tal manera que no es posible cubrirla con las centrales hidráulicas instaladas.

En la actualidad, sólo el 1% de la energía del país es hidráulica y la mayor fuente de energía sigue siendo la madera y el carbón vegetal, que suponen algo más del 70% de la energía generada. Si nos centramos únicamente en la energía eléctrica, la hidráulica supone un 30% de la generación, mientras que el resto se produce en centrales térmicas.

En Haití, como se ha podido comprobar en la [Tabla 8](#) y [Tabla 9](#), hay variaciones según la fuente consultada para la capacidad instalada y la energía generada. La potencia nominal hidroeléctrica en el país varía de 50 hasta 63 MW, mientras que para la energía generada los datos oscilan entre 120 y 479 GWh en el año 2011. Únicamente se dispone de un valor para la potencia disponible, 17,6 MW.

Como pasaba con la potencia hidroeléctrica instalada, en Peligre, también hay variaciones para las distintas fuentes, [Tabla 10](#). La potencia nominal de la central varía entre 54 y 47,1 MW y para la potencia disponible hay valores entre 10 y 30 MW.

Se puede observar que hay variaciones significativas entre los valores proporcionados por las distintas fuentes consultadas para la potencia instalada, esto es debido en gran parte a las pequeñas turbinas instaladas de las que no se tiene suficientes datos. Se puede descartar el valor de 50 MW porque sólo considerando la central de Peligre ya se supera.

La potencia disponible, 17,6 MW, únicamente se obtiene del BID, porque no hay tanta información sobre la capacidad disponible de las centrales hidroeléctricas de menor tamaño, ya que es pequeña en comparación con la aportada por Peligre.

Los 479 GWh parece un valor demasiado elevado según la capacidad instalada en el país y está muy lejos de los 120 GWh obtenido de la otra fuente disponible. Más tarde se analizará numéricamente si estos valores son posibles y cuál de ellos es más probable.

Todas las fuentes, a excepción de BME, coinciden en que la capacidad instalada en Peligre es 54 MW. Sin embargo en la potencia disponible se encuentra disparidad en los datos. Se

conoce que la central está en malas condiciones principalmente porque los equipos han terminado su vida útil y por la sedimentación del embalse, pero es difícil determinar cuál es la capacidad disponible.

Se va a analizar numéricamente si son posibles los datos obtenidos para la energía generada, pero hay que tener en cuenta que varía según el año en gran medida por el caudal disponible en el río. El factor de utilización (UF) es el cociente entre la energía total generada (TG) y la energía máxima que puede proporcionar la instalación. Entendiendo la energía máxima como la obtenida si la central trabajase a potencia nominal (MDC) durante 24 horas todos los días del año (PH). Usando los datos proporcionados por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2010), es decir la potencia total instalada es 61,7 MW y la disponible de 17,1 MW.

$$UF_1 = \frac{479 \cdot 10^3}{17,6 \cdot 24 \cdot 365} = 310 \%$$

$$UF_2 = \frac{120 \cdot 10^3}{17,6 \cdot 24 \cdot 365} = 78 \%$$

El factor de utilización basándose en los datos de World Energy Council (UF_1) tiene un valor muy grande, por encima del 100 %. Por tanto no sería posible obtener una energía de 479 GWh con la capacidad disponible en Haití. Ni siquiera se podría generar dicha energía usando la potencia nominal proporcionada por la misma fuente, 63 MW, porque el factor de utilización sería del 87 %.

Además, las turbinas no trabajan siempre a potencia máxima y las pérdidas primarias, secundarias y las debidas a los elementos de la instalación, como la turbina o el generador, hacen que la potencia obtenida sea menor. Todas estas pérdidas se estiman entre un 20 – 25 % de la potencia instalada. Bajo estas condiciones, aunque la instalación tuviera el máximo de capacidad disponible, el factor de utilización seguiría superando el 100 %. Por todo lo comentado anteriormente no se considera correcto el valor procedente de World Energy Council.

El factor de utilización según los datos de International Energy Agency (UF_2) es también elevado, aunque no llega al 100%, sin embargo si se aplica un rendimiento del 25 % el factor de utilización lo sobrepasaría y haría la energía generada inviable. Por el contrario, si la instalación funcionará con la potencia instalada se obtendría un factor de utilización entre el 20 y el 30 %. El valor procedente de IEA se puede considerar correcto si la potencia disponible es mayor que la considerada.

El factor de servicio (SF) se define como el cociente entre las horas de funcionamiento actual u horas de servicio (SH) y las horas de funcionamiento disponibles (PH). Se expresa como un porcentaje.

En el caso de IEA el factor de servicio según la potencia disponible es:

$$SH = \frac{120 \cdot 1000}{17,6 \cdot 0,80 \cdot 365} = 18,68 \text{ h}$$

$$SF = \frac{18,68}{24} \cdot 100 = 78 \%$$

Las centrales hidroeléctricas funcionarán durante una media diaria de 18 horas y 13 minutos durante todo el año para producir 120 GWh, un valor demasiado alto para este tipo de instalaciones porque se está calculando en condiciones ideales, sin tener en cuenta las pérdidas y el rendimiento. El factor de servicio es 78 % y si se consideran las pérdidas el valor sería 97 %.

Como se ha podido observar los datos disponibles presentan algunas incoherencias y esto complica cualquier estudio que se quiera llevar a cabo sobre la situación que está viviendo el país y la capacidad energética que tiene.

2. Centrales hidroeléctricas en Haití

En la actualidad en Haití existen 8 centrales hidráulicas, de las cuáles una de ellas no está en funcionamiento. En la [Tabla 11](#) se nombran todas estas centrales y además se especifica la altura de la caída, la potencia instalada y el tipo de turbina que está instalada en la actualidad. Además en 2008 se hizo una propuesta para la construcción de la nueva central hidroeléctrica de Artibonite 4C.

Artibonite 4C es una planta con una potencia instalada de 32 MW y se encuentra en el río Artibonite, aguas abajo de la central hidroeléctrica de Peligre y cerca de ciudad de Mirebalais, situada a 60 kilómetros de Puerto Príncipe. La central está situada en una región donde se dedican principalmente al cultivo de arroz, por eso es muy importante hacer una evaluación considerando los aspectos ambientales, técnicos y económicos (BID, 2014).

RÍOS	LUGAR	ALTURA DE CAÍDA (m)	POTENCIA INSTALADA (MW)	TIPO DE TURBINA	CAUDAL TURBINABLE (m3/s)	REFERENCIA
Artibonite	Péligre	12	18 x 3uds	Francis (1971)	169,89	1
Artibonite	Drouet	9	2,8		35,237	2
Cavaillon	Saut Mathurine	110	2,4	Ossberger (1978)	2,617	3
Cayes-Jacmel	Gaillard	210	0,5	Pelton (1983)	0,270	4
Onde Verde	Belladère	16,5	0,3	Pelton (1985)	2,059	5
Caracol	Caracol	160	0,85	Ossberger (1983)	0,637	6
Diluvio	Diluvio-Lanzac	298	0,8	Pelton (1985)	0,304	7
Petite-Rivière	Milot	111	0,13	Pelton (1991)	0,133	8

Tabla 11: Información de las centrales hidroeléctricas existentes y caudal turbinable (BME, 2014.b)

Hay que tener en cuenta que no se disponen de datos suficientes sobre los ríos y los caudales de cada uno de ellos para hacer un estudio hidrológico y poder calcular y dimensionar las centrales hidráulicas.

El caudal promedio anual en un río es la media de los caudales medios diarios durante todo el año. En la [Tabla 2](#) aparece esta información para los principales ríos de Haití. No son conocidos los datos de algunos de los ríos en los que se encuentran instaladas las turbinas hidráulicas más pequeñas, ya que son ríos de menor importancia.

El caudal ecológico se define como el flujo de agua requerido para mantener las necesidades mínimas de los ecosistemas acuáticos existentes y preservar los valores ecológicos del cauce. Existen numerosos criterios para calcular el caudal ecológico según el

texto consultado. El caudal ecológico en Colombia se toma como el 25% de los volúmenes anuales en condiciones de oferta media (Riestra, 2000), mientras el caudal ecológico en Austria se toma como un 33% del flujo medio (Arthington, A. H., Bunn, S. E. et al., 2006). Hay mucha bibliografía sobre este tema y aparece más detalladamente los métodos existentes y los factores que se tienen en cuenta para cada uno de ellos en el texto de Parra Rodríguez, E.A. (2012). En nuestro caso se va a tomar el caudal ecológico como el 25% del caudal promedio del río.

El caudal turbinable o nominal de la instalación es aquel que usa la turbina para producir potencia y se define como la diferencia entre caudal promedio y caudal ecológico. Para calcular el valor del caudal turbinable nos basaremos en los datos que tenemos de las turbinas existentes, las caídas y la potencia de las turbinas instaladas actualmente. El caudal turbinable se calcula a partir de la expresión:

$$Q = \frac{W}{H \cdot \eta \cdot \rho \cdot g}$$

- Q: caudal turbinable
- W: potencia
- H: altura bruta
- η : rendimiento total de la instalación. Se va a suponer un de 90%.
- ρ : densidad del agua
- g: gravedad

En la **Figura 1** **Figura 14** se muestra un mapa con la localización aproximada de las centrales hidroeléctricas de Haití. Se hace referencia a cada una de ellas mediante el número que se las ha asignado en la **Tabla 11**.



Figura 14: Situación de las centrales hidroeléctricas

2.1. Determinación de la turbina para cada instalación

Se va a hacer un análisis de las turbinas que están funcionando en Haití en este momento y se especifica cuál es el tipo de turbina idóneo para cada una de las instalaciones existentes en función de la potencia útil (P_u) y la altura bruta (H_b).

En la [Figura 15](#) se representan los rangos de utilización de las turbinas Kaplan (TK), Francis (TF), Pelton (TP), Turgo y Banki. Aparecen dibujadas los puntos de funcionamiento de cada una de las turbinas de las plantas hidroeléctricas con los números que se les ha asignado en las referencias de la [Tabla 11](#).

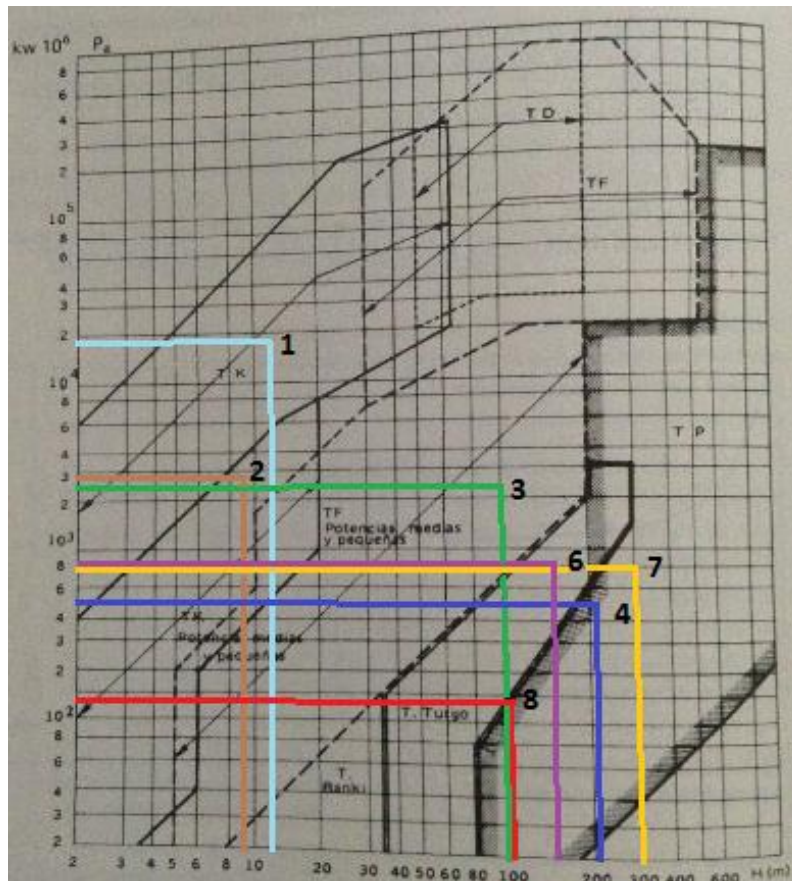


Figura 15: Zona de utilización de los distintos tipos de turbinas hidráulicas. (Mataix, 2009)

A continuación, en la [Tabla 12](#), se muestran los resultados obtenidos:

1	Turbina Kaplan
2	Turbina Kaplan pequeña y media potencia
3	Turbina Francis pequeña y media potencia
4	Turbina Pelton
5	Turbina Turgo
6	Turbina Francis pequeña y media potencia
7	Turbina Pelton
8	Turbina Pelton

Tabla 12: Tipo de turbina para cada una de las instalaciones

Por otro lado, como en dos de las instalaciones se utilizan turbinas Ossberger, se analiza en la [Figura 16](#) si las turbinas utilizadas en las centrales hidroeléctricas existentes en Haití están dentro del rango de utilización de este tipo de turbinas y por tanto son las adecuadas para la altura y la potencia considerada:

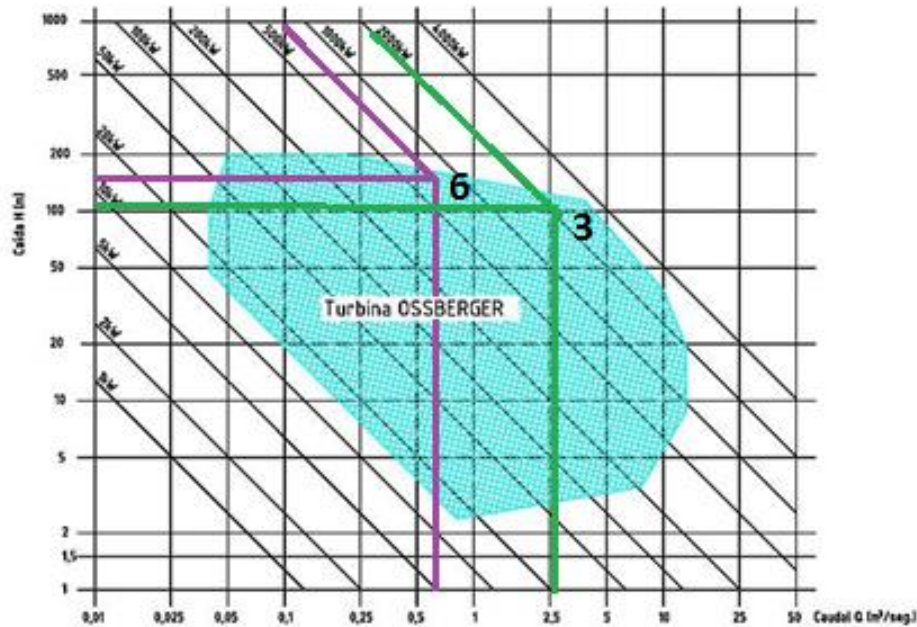


Figura 16: Rango de utilización turbinas Ossberger. (Ossberger, 2014)

Como se puede ver en Saut Mathurine (3) y Caracol (6) si es apropiado usar una Turbina Ossberger, aunque también podría usarse las turbinas mencionadas anteriormente y esto permitiría obtener mayores potencias. Más adelante se hará un pequeño análisis para determinar cuál de ellas será la óptima en el caso de Saut Mathurine.

3. Estudio de caso: Saut Mathurine

La central hidroeléctrica de Saut Mathurine, [Figura 17](#), está situada en el Río Cavaillon, dentro del Departamento Sur. En la [Tabla 13](#) aparecen los datos más importantes de este río:

RÍO	CAUDAL MÁXIMO (m ³ /s)	CAUDAL MÍNIMO (m ³ /s)	CAUDAL PROMEDIO (m ³ /s)	LONGITUD (km)
Cavaillon	1035	0,7	8	49

Tabla 13: Caudal Río Cavaillon. (PNUE, 2010)

Como se ha comentado anteriormente en Haití no existen estudios hidrológicos de los principales ríos del país, pero durante los últimos años se ha creado La Red Ambiental de Haití (HEN), que está dirigida por un equipo de investigadores de la Universidad de Columbia con el apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y los colaboradores del gobierno haitiano y las ONG locales (HEN, 2014). La HEN se encarga de desarrollar e implementar una red de estaciones de monitoreo de la climatología y la hidrología en toda la costa suroeste de Haití, en la cual está incluida Saut Mathurine.



Figura 17: Planta hidroeléctrica Saut Mathurine

En la actualidad sigue en funcionamiento la central hidroeléctrica usando una turbina Ossberger, [Tabla 11](#). Sin embargo dependiendo de la fuente consultada, los datos sobre la potencia instalada varían, según EDH la potencia de la central de Saut Mathurine es 1,6 MW y según BME es 2,4 MW.

Se va a llevar a cabo un análisis que permita determinar cuál es la turbina óptima para esta instalación. Para ello se va a usar las variables disponibles:

- Altura del salto o altura bruta: 110m
- Caudal promedio: 8 m³/s

Como se ha comentado anteriormente se va a tomar el caudal ecológico como el 25% del caudal promedio del río, ya que no se dispone de suficiente información sobre la hidrología. El caudal turbinable es:

$$Q = 8 - 0,25 \cdot 8 = 6 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.1. Altura neta

La altura neta es la variación de altura experimentada por el fluido al atravesar la máquina, teniendo en cuenta las pérdidas en la conducción. Se va a calcular la como la diferencia entre la altura bruta y las pérdidas.

$$H_n = H_b - H_r$$

Las pérdidas totales (H_r) se calculan como la suma de las pérdidas primarias y secundarias de la instalación. Las pérdidas primarias son las que están directamente relacionadas con la rugosidad de las tuberías y con el régimen de flujo. Las pérdidas secundarias se producen por las irregularidades o singularidades de la conducción que producen el desprendimiento de la capa límite. Estas irregularidades son debidas a los codos, las rejillas y la válvula de compuerta.

Como no tenemos datos de la tubería forzada, y considerando que se usa la ya existente, estimaremos la pérdida de la instalación en un 10%, ya que es el un valor entorno al que oscilan las pérdidas en este tipo de instalaciones (Mataix, 2009).

$$H_n = 110 - 0,10 \cdot 110 = 99\text{m}$$

3.2. Elección del tipo de turbina

En función del salto neto y del caudal del río se va a obtener cuál es la turbina idónea para:

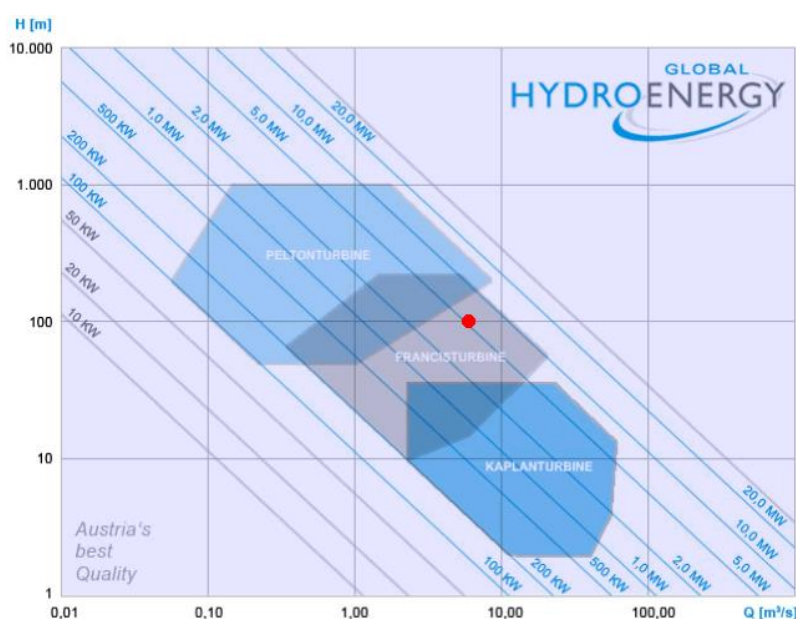


Figura 18: Elección gráfica del tipo de turbina para Saut Mathurine. (Global Hydro Energy, 2014)

Según la gráfica obtenida de la empresa Global Hydro Energy, [Figura 18](#), la turbina idónea es una Francis y la potencia instalada será próxima a 5MW (el punto de funcionamiento viene marcado en rojo). Las instalaciones de esa potencia entran dentro de las pequeñas centrales, que se utilizan para provisión de servicios, para usos productivos o para proporcionar electricidad a cerca de 30 familias.

Las turbinas Francis se usan para caudales y alturas medias. Este tipo de turbinas son turbinas semiaxiales que pertenecen al grupo de turbinas de reacción y como tal son de admisión total, es decir, el caudal se reparte por toda la periferia del rodete. Las principales partes de este tipo de turbinas son: el rodete ([Figura 19](#)), la cámara espiral, el distribuidor y el tubo de aspiración.



Figura 19: Rodete turbina Francis

Se va a llevar a cabo un análisis más preciso del tipo de turbina y las dimensiones del rodete, así como del generador, usando también como variable la velocidad específica y teniendo en cuenta las pérdidas en la instalación.

3.3. Potencia útil

La potencia neta o potencia absorbida (P_n) se calcula a partir de la altura neta y teniendo en cuenta solamente el rendimiento hidráulico de la tubería forzada:

$$P_n = Q \cdot H_n \cdot \rho \cdot g$$

$$P_n = 8 \cdot 99 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 5827,14kW$$

La potencia útil o potencia en el eje (P_u) tiene en cuenta no sólo el rendimiento debido a la tubería forzada, sino también el rendimiento total de la turbina. El rendimiento total es el producto del rendimiento volumétrico (η_v), hidráulico (η_h), mecánico (η_m) y el debido al

rozamiento de disco y ventilación (η_v). Estos rendimientos se estiman a partir del texto, (Mataix, 2009), que da unos valores indicativos para cada uno de ellos:

- η_v : entre 0,98 y 0,995
- η_h : entre 0,90 y 0,96
- η_m : superior a 0,98
- η_{rv} : es muy pequeño

Con esos datos se calcula el rendimiento total y la potencia útil:

$$\eta_{tot} = \eta_v \cdot \eta_h \cdot \eta_m = 0,86$$

$$P_u = \eta_{tot} \cdot P_n$$

$$P_u = 5827,14 \cdot 0,86 = 5011,34 \text{ kW}$$

La turbina elegida es una turbina Francis con una potencia nominal de 5,8 MW. La potencia útil estimada es 5MW.

3.4. Velocidad máxima admisible

El número específico de revoluciones (n_s) es el número de revoluciones a las que debería girar una turbina hidráulica para suministrar al eje una potencia de valor unidad, en un salto de altura unidad, con un rendimiento óptimo. El número específico de revoluciones, n_s , es adimensional.

Según el número específico de revoluciones se puede hacer una clasificación de las turbinas hidráulicas en: lentas, normales, rápidas y exprés. A continuación aparece una gráfica que permite obtener el número específico de revoluciones a partir de la altura neta.

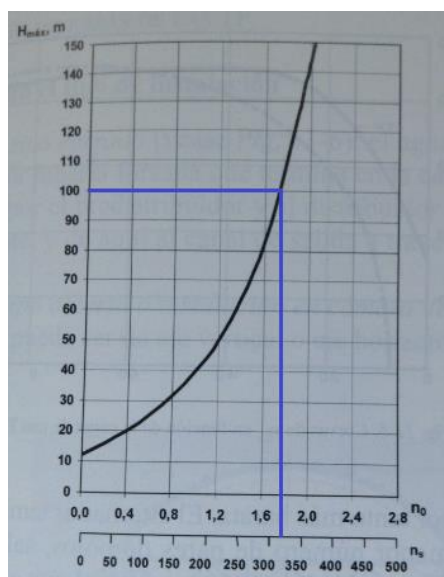


Figura 20: Valor de las revoluciones específicas en función de la altura neta (Mataix, 2009)

De la [Figura 20](#) se obtiene un valor para n_s de 315. Y se comprueba con la [Tabla 14](#) que se encuentra dentro del rango de velocidades específicas típico para una Turbina Francis. El criterio para seleccionar la turbina a partir de la velocidad específica es más preciso que el usado anteriormente donde las variables eran la altura y el caudal.

TIPO DE TURBINA	RANGO DE VELOCIDADES ESPECÍFICAS
Pelton de 1 tobera	$4,975 < n_s < 24,875$
Pelton de z toberas	$4,975 \cdot z^{1/2} < n_s < 24,875 \cdot z^{1/2}$
Francis	$49,75 < n_s < 328,35$
Kaplan, Hélice, Bulbo	$189,05 < n_s < 1542,25$

Tabla 14: Rango de velocidades específicas para cada tipo de turbina (ESHA, 2006)

La velocidad de rotación máxima admisible (n) se calcula en función de su velocidad específica, su potencia útil y de la altura neta del aprovechamiento.

$$n_s = n \cdot P_u^{1/2} \cdot H_n^{-5/4}$$

$$n = \frac{315 \cdot 99^{5/4}}{\sqrt{5011,34}} = 1389,56 \text{ rpm}$$

La velocidad de rotación para la instalación es 1389 rpm y es necesaria para saber cuál es el generador que se va a utilizar.

3.5. Elección del generador

El generador es el encargado de transformar la energía mecánica suministrada por la turbina en energía eléctrica. Se usan como norma general generadores de corriente continua. Para redes pequeñas, en las que su potencia representa una proporción importante, se escogen alternadores síncronos, mientras que para las redes grandes se usan alternadores asíncronos.

Lo más frecuente es acoplar directamente la turbina hidráulica al alternador, que debe girar a una velocidad constante para mantener la frecuencia constante. También se podría usar una transmisión mediante engranajes o multiplicador, pero esto haría que la instalación fuera más compleja y hubiese más pérdidas. La velocidad del alternador se calcula con el número de pares de polos y la frecuencia de la corriente, que en Haití es 60Hz.

$$n = \frac{f}{p} \text{ (rps)}$$

$$p = \frac{60 \cdot 60}{1389,56} = 2,59$$

En los pequeños aprovechamientos suelen usarse generadores estándar. En la [Tabla 15](#) aparecen las velocidades de sincronismo de las turbinas directamente acopladas a los alternadores de 1 a 12 pares de polos para 60 Hz de frecuencia:

VELOCIDAD DE SINCRONISMO PARA $f=60\text{Hz}$												
p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n (rpm)	3600	1800	1200	900	720	600	514,3	450	400	360	327,3	300

Tabla 15: Velocidad de sincronismo según el número de pares de polos

Elegimos un alternador de 3 pares de polos, con una velocidad de sincronismo de 1200 rpm. Con el valor de la velocidad de sincronismo se recalcula el valor del número específico de revoluciones.

$$n_s = 1200 \cdot 5011,34^{\frac{1}{2}} \cdot 99^{-\frac{5}{4}} = 272,03$$

El número específico de revoluciones para la instalación, si se usa un generador de 3 pares de polos y velocidad 1200 rpm, es 272.

3.6. Dimensiones principales de turbina hidráulica

Se van a estimar las dimensiones principales de la turbina, representadas en la Figura 21, como anteproyecto para el diseño de la central. Dado que no existe un método generalmente aceptado para el diseño de turbomáquinas hidráulicas, se va a realizar los cálculos mediante los métodos propuestos en Mataix, 2008.

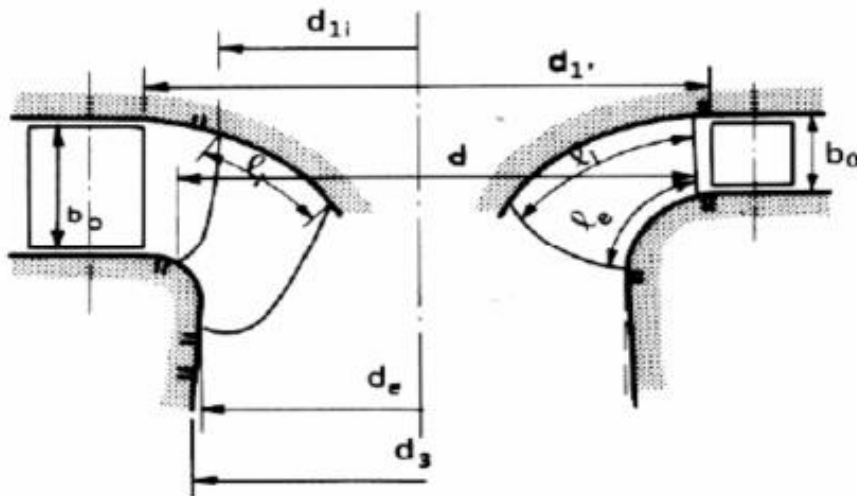


Figura 21: Dimensiones principales de una Turbina Francis. (Mataix, 2009)

A partir de n_o , la velocidad específica máxima admisible sin peligro de cavitación, se puede determinar fácilmente el tamaño de la turbina y sus dimensiones principales a partir de la Tabla 16. Los valores designados con el subíndice 11 se denominan valores unitarios y corresponden a una turbina unitaria geoméricamente semejante a 1 metro de diámetro y funcionando bajo un salto de 1 metro de altura. De esta manera nos permitirá conocer el valor para cualquier turbina interpolando con los valores conocidos.

n_s	Q_{11}	n_{11}	d_{1i}/d	$d_{1'}/d$	d_3/d	b_0/d	l_i/d	l_e/d
60	0,123	61	1,0	1,04	0,6	0,055	0,36	0,27
100	0,230	62,5	1,0	1,052	0,68	0,1	0,32	0,22
200	0,715	70	0,92	1,02	0,955	0,23	0,26	0,14
300	1,166	82,5	0,775	1,03	1,12	0,326	0,26	0,14
350	1,280	92,5	0,695	0,99	1,15	0,327	0,28	0,15

Tabla 16: Dimensiones principales de una Turbina Francis en función de n_s . (Mataix, 2009)

En la **Tabla 17** aparecen los valores calculados a partir de la tabla anterior. En nuestro caso usamos la velocidad específica calculada anteriormente:

$$n_s = 272$$

n_s	Q_{11}	n_{11}	d_{1i}/d	$d_{1'}/d$	d_3/d	b_0/d	l_i/d	l_e/d
272,03	1,04	79	0,82	1,03	1,08	0,3	0,26	0,14

Tabla 17: Dimensiones de la turbina Francis para una $n_s = 272$

Se va a calcular el diámetro exterior de entrada en el rodete (d) a partir del valor n_{11} obtenido por interpolación y así poder calcular el resto de magnitudes de la turbina que aparecían representadas en la **Figura 21**. Los valores numéricos calculados aparecen en la **Tabla 18**:

$$d = \frac{n_{11}}{n} \cdot \sqrt{H_n}$$

$$d = \frac{79}{1200} \cdot \sqrt{99} = 0,66 \text{ m}$$

DIMENSIONES PRINCIPALES DE LA TURBINA						
d	d_{1i}	$d_{1'}$	d_3	b_0	l_i	l_e
0,66	0,54	0,68	0,71	0,2	0,17	0,09

Tabla 18: Dimensiones principales para la turbina Francis

El diámetro exterior de entrada en el rodete tiene un valor de 0,66 m y el de salida del rodete de 0,71 m.

3.7. Número de álabes del rodete

El número de álabes óptimo (Z) puede estimarse en función del número específico de revoluciones según las curvas de la [Figura 22](#):

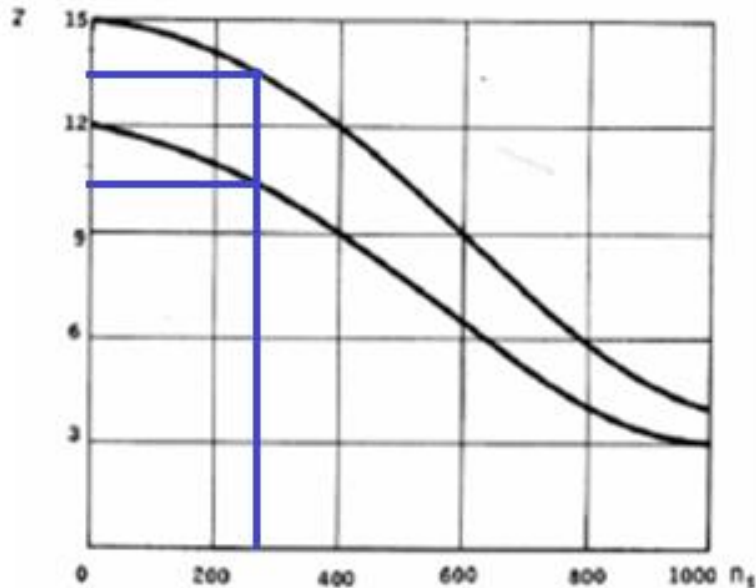


Figura 22: Estimación del número de álabes en función de n_s . (Mataix, 2009)

Se puede escoger un número de álabes entre 11 y 13. Se toma un valor intermedio, por tanto el número de álabes es 12.

3.8. Resumen de los valores obtenidos

En los apartados anteriores se han calculado los valores para el anteproyecto de la instalación: dimensionamiento de la turbina, las características principales del generador que se va a utilizar, así como la potencia que es capaz de proporcionar la planta de Saut Mathurine.

La turbina elegida para la instalación es una turbina Francis con una potencia nominal de 5,8 MW. La potencia útil o del eje es de 5 MW y la velocidad de rotación es 1200 rpm. Se va a utilizar un generador síncrono con 3 pares de polos y número específico de revoluciones: $n_s = 272,03$.

El rodete tiene un diámetro exterior de entrada de 0,66 m y el de salida de 0,71 m, se dan una serie de valores para dimensionar el rodete que aparecen en la [Tabla 18](#).

El número de álabes estimado para la turbina Francis elegida es 12.

3.9. Comparación del montaje actual con el anteproyecto realizado

Con el montaje estudiado se podría conseguir 5,8 MW de potencia frente a los 2,4 MW que se consiguen actualmente en condiciones óptimas de funcionamiento. Por tanto el nuevo diseño permitiría duplicar la potencia de la central hidroeléctrica de Saut Mathurine.

Esto se puede conseguir gracias a la utilización de una turbina Francis que permite obtener potencias más altas que la turbina Ossberger instalada en la actualidad.

Esto permitiría no sólo aumentar la potencia instalada en Haití, sino concretamente en el Departamento Sur, donde el acceso a la electricidad es muy limitado como se puede comprobar en la [Tabla 6](#). Permitiría duplicar la potencia hidráulica instalada y triplicar la potencia disponible en esta región. La potencia eléctrica total aumentaría un 15% y la capacidad disponible total en un 40 %.

4. Estudio de caso: Peligre

La presa de Peligre está situada en el Río Artibonite. Se trata de una presa de gravedad, como se ve en la [Figura 24](#), con una altura de 72m, cuya construcción fue acabada en el año 1956 con el fin de controlar las aguas de Río Artibonite. En 1971 se instalaron tres turbinas Francis de 18MW cada una, para la generación de electricidad, [Figura 23](#). La capacidad total del embalse es 297 000 000 m³ y la capacidad activa 249 000 000 m³. La altura bruta de la caída es 12 m.

La central hidroeléctrica de Peligre tiene dos funciones:

- Regular y controlar el flujo de río para evitar inundaciones en el Valle de Artibonite
- Permitir la generación de energía renovable a gran escala. Antes la central proporcionaba aproximadamente el 50% del suministro al sistema nacional, pero con los años se han ido deteriorando los sistemas electromecánicos.



Figura 24: Central hidroeléctrica de Peligre



Figura 23: Turbinas Peligre

4.1. Estado y plan actual de Rehabilitación de la Central de Peligre

En los últimos años la producción media anual de Peligre ha ido disminuyendo y actualmente está por debajo del 50 %. Este descenso se debe al envejecimiento físico de la planta, cuyos componentes electromecánicos ya han completado su vida útil, a los volúmenes reducidos de agua en el embalse y a la sedimentación causada principalmente por la deforestación y la gestión inadecuada del Valle de Artibonite.

Con el fin de rehabilitar la central hidroeléctrica El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) aprobó en Noviembre de 2008 la propuesta de subvención para el Programa de Rehabilitación de la Central Hidroeléctrica de Peligre (Gómez, J. R., 2011). El objetivo es restaurar y preservar la capacidad de Haití para generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables y poder garantizar el suministro de electricidad a Puerto Príncipe rehabilitando la línea de transmisión.

Se ha llevado a cabo una serie de estudios técnicos para analizar: los niveles de sedimentación en la cuenca, la integridad estructural de la presa tras el terremoto sufrido y la estabilidad eléctrica. Tras finalizar estos estudios se determinó que los niveles de sedimentación actual y proyectada no se consideran una amenaza para la central si se toman las medidas que fueron aportadas en dicho estudio y que la presa no había sufrido daños por el sismo.

En el Programa de Rehabilitación Electromecánica de la Central Hidroeléctrica de Peligre (BID, 2011), tras los estudios realizados, se ha concluido que existen una serie de problemas e impactos ambientales y sociales de los que cabe destacar:

- Inundaciones periódicas aguas abajo de la presa por una apertura excesiva de sus compuertas y por la falta de un estudio de EDH sobre el volumen del embalse que debía ser preservado para captar las lluvias.
- Falta de coordinación entre el EDH y la Organización para Desarrollo del Valle de Artibonite (ODVA), la cual no tiene control sobre la presa. Actualmente hay un conflicto entre las funciones de la presa de generar energía y la de contener inundaciones en el Valle de Artibonite. El acuerdo y la comunicación entre EDH y ODVA es una de las condiciones para la concesión del proyecto de rehabilitación.
- Falta de datos hidrológicos, ya que EDH no posee un sistema que permita medir el nivel de los ríos que confluyen en la presa. Dicho sistema permitiría predecir la crecida y abrir de manera controlada las compuertas sin producir inundaciones.
- Se produce sedimentación en el fondo del embalse y hay que vaciarlo para el mantenimiento de los quipos sumergidos y la limpieza. La limpieza dura alrededor de 30 días y se realiza en época seca. Los estudios determinan que el embalse podría operar durante 20 años con la misma potencia sin una limpieza total.
- Es importante controlar la erosión de la Cuenca del Río Artibonite reduciendo la entrada de sedimentos. El origen de los sedimentos es debido principalmente al descenso rápido del agua de lluvia que arrastra todo aquello que hay en los márgenes del río al no estar protegido con plantas.

Tras un análisis socio-económico se determina que la mejor opción es no vaciar la presa para la rehabilitación de la central hidroeléctrica y además proponen crear un comité donde halla representación del EDH, ODVA y los agricultores, con el fin de mejorar la comunicación.

El 10 de Febrero de 2012, el ministro de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones (MTCPTC), ha anunciado la firma de un contrato para la rehabilitación de la planta de Peligre con la firma francesa Alstom-Comelex, para restaurar la potencia nominal de 54MW. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Agencia de Cooperación Alemana (KfW) y el Fondo para el Desarrollo Internacional de Países Exportadores de Petróleo (IOFID) financiarán el proyecto de rehabilitación de Peligre durante tres años, con un costo de 48,8 millones de dólares. También se modernizarán los equipos electromecánicos y sus sistemas de control.

4.2. Estudio del caudal en Peligre

Al inicio de este capítulo, se ha hecho un análisis de la potencia instalada y la potencia disponible de la Central Hidroeléctrica de Peligre a partir de los datos obtenidos de distintas fuentes, [Tabla 10](#). Se concluye que la potencia instalada en la central son 54 MW y la capacidad disponible es más complicada de determinar su valor, porque varía entre 10 y 30 MW. Se va a utilizar el valor proporcionado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2010), 13 MW, es decir, sólo está disponible el 25 % de la capacidad instalada. El factor de utilización de la central es de alrededor de un 80 %.

Se han consultado varias fuentes para determinar el caudal promedio del Río Artibonite y poder contrastar esta información, porque los datos no son actuales y además no se sabe en qué punto del río está medido el caudal. La información referente a los ríos en Haití es muy limitada al no haber estudios hidrológicos completos. Según el Ministerio de Medioambiente (MDE, 2001) el caudal promedio del Río Artibonite es 100 m³/s, para el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUE, 2010) es 101,4 m³/s y según The United Haitian Home Page (UHHP, 2014) el caudal es 84 m³/s.

En la [Tabla 19](#) aparece el caudal promedio del Río Artibonite (MDE, 2001) y también la longitud, el caudal máximo y el mínimo (PNUE, 2010).

RÍO	CAUDAL MÁXIMO (m ³ /s)	CAUDAL MÍNIMO (m ³ /s)	CAUDAL PROMEDIO (m ³ /s)	LONGITUD (km)
Artibonite	2500	8,4	100	280

Tabla 19: Caudal Río Artibonite. (PNUE, 2010) y (MDE, 2001)

El caudal ecológico se estima como el 25% del caudal promedio del río según el razonamiento antes realizado, y por tanto el caudal turbinable que permite preservar el ecosistema es:

$$Q_{tur,1} = 100 - 0,25 \cdot 100 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por otro lado se calcula también el caudal turbinable para cada una de las turbinas instaladas actualmente en la Central Hidroeléctrica de Peligre, y se comparará con el valor obtenido de las fuentes consultadas. Dicho caudal ha sido calculado para todas las centrales del país y aparece en la [Tabla 11](#), se detalla a continuación para Peligre:

$$Q_{tur} = \frac{W}{H \cdot \eta \cdot \rho \cdot g}$$

$$Q_{tur,2} = \frac{18 \cdot 10^6}{12 \cdot 0,90 \cdot 1000 \cdot 9,81} = 169,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal turbinable de cada una de las turbinas es aproximadamente 170 m³/s, lo que supone que el caudal total de la instalación es 510 m³/s. Pero este caudal, comparado con el caudal promedio obtenido de distintas fuentes, tiene un valor muy grande y supondría un factor de servicio para la central muy pequeño:

$$SH = \frac{75 \cdot 24}{3 \cdot 170} = 3,52 \text{ h}$$

$$SF = \frac{3,52}{24} \cdot 100 = 14,70 \%$$

La Central Hidroeléctrica de Peligre tiene un factor de servicio de aproximadamente 15 % y por tanto trabaja como una central de pico y no una central base. No es capaz de suministrar suficientes horas de electricidad a la capital Puerto Príncipe y el resto de demanda tiene que ser cubierta por medio de centrales térmicas, lo que explica que estén aumentando en los últimos años.

Los resultados obtenidos a partir de la producción media anual son muy diferentes a los hallados teniendo en cuenta el caudal turbinable de la central y el caudal promedio del río. Esto podría ser debido a que no son correctos los datos obtenidos para el caudal promedio según las tres fuentes consultadas o que el caudal no ha sido medido a la entrada de la presa de Peligre. También hay que tener en cuenta que el caudal varía durante los diferentes años y ha podido haber una reducción del mismo desde el año 1971, en el que se puso en marcha la instalación. Además, en esta época había una conciencia ecológica menor, y puede que no se tuviera en cuenta el caudal ecológico del Río Artibonite.

Aun analizando todos los factores anteriores se puede ver que la diferencia entre ambos caudales es muy grande y para obtener un factor de servicio del 70 % para Peligre sería necesario que el río tuviera un caudal turbinable de 360 m³/s, muy lejos de los 75 m³/s actuales.

A continuación se va a analizar cuál es la mejor turbina para esta instalación. Se ha expuesto en el apartado anterior que ya está en marcha el Proyecto de Rehabilitación de la Central Hidroeléctrica de Peligre, pero aun así haremos un pequeño estudio para ver cuál sería la turbina que mejor se adapta a la instalación y cuáles son las dimensiones principales de la misma.

Por lo expuesto anteriormente, se va a usar como caudal promedio un valor aproximado de 100 m³/s, ya que hay varias fuentes que lo respaldan (MDE, 2001 y PNUE, 2010). Por tanto las variables disponibles para el dimensionamiento de la instalación son:

- Altura del salto o altura bruta: 12 m
- Caudal turbinable: 75 m³/s

4.3. Altura neta

Se estima la pérdida de la instalación en un 10% y se calcula la altura neta:

$$H_n = 12 - 0,10 \cdot 12 = 10,8 \text{ m}$$

4.4. Elección del tipo de turbina

En la actualidad la potencia instalada es 54 MW y la central cuenta con tres turbinas Francis de 18 MW cada una para suministrar dicha potencia. El caudal turbinable de cada una de ellas, según se ha calculado en la [Tabla 11](#), es de 170 m³/s. Este caudal es muy grande y se sale del rango de funcionamiento de los principales fabricantes de este tipo de turbinas, que para las potencias más altas no superan los 140-150 m³/s. Por otro lado la altura del salto es pequeña, 12 m, y como se puede comprobar en la [Figura 25](#) lo apropiado es usar una turbina Kaplan, ya que estas turbinas son apropiadas para pequeños saltos y grandes caudales.

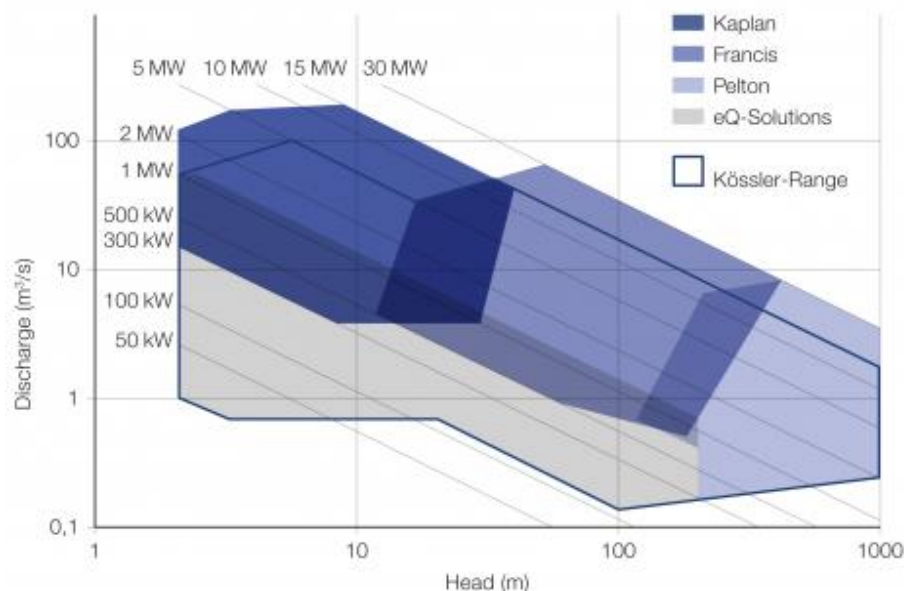


Figura 25: Elección gráfica del tipo de turbina (Kössler, 2014)

Las turbinas Kaplan y de hélice son turbinas axiales según la dirección del agua en el rodete. Son turbinas de reacción que se caracterizan por tener una presión menor a la atmosférica a la salida del rodete y por ser de admisión total.

Las partes principales de las turbinas Kaplan y de hélice son: el rodete ([Figura 26](#)), el distribuidor, el tubo de aspiración y en las turbinas Kaplan el mecanismo para poder orientar los álabes.

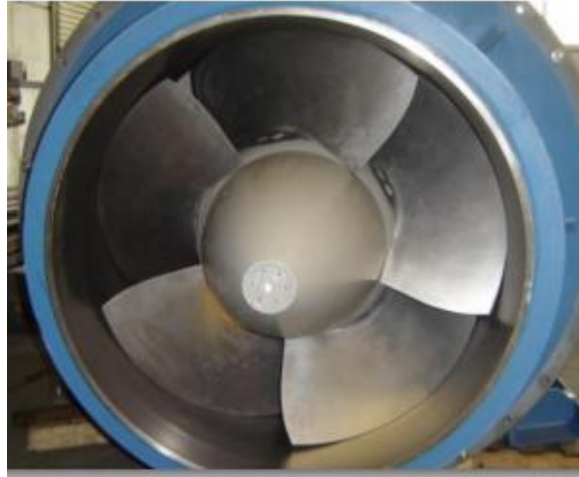


Figura 26: Rodete turbina Kaplan. (Kössler, 2014)

Para poder suministrar aproximadamente 5 horas de electricidad la solución sería colocar tres turbinas Kaplan con potencia de 15 MW cada una. El caudal turbinable de cada una es 128 m³/s. Por tanto la potencia instalada de la central hidroeléctrica es 45 MW. Las centrales con esta potencia pertenecen a las centrales medias según su potencia y permiten aportar electricidad a centros poblados, llegando a abastecer de 50 a 300 familias. Además es una central a pie de presa que permite regular el caudal y asegurar un abastecimiento más continuo.

El factor de servicio se calcula a partir del caudal que se puede usar del río si se tiene en cuenta el caudal ecológico y el caudal turbinable de la instalación según las turbinas elegidas:

$$SH = \frac{75 \cdot 24}{3 \cdot 128} = 4,69 \text{ h}$$

$$SF = \frac{4,69}{24} \cdot 100 = 20 \%$$

En este caso el factor de servicio es del 20 %, es un valor pequeño, pero supera al factor de servicio de la instalación original.

Las turbinas Kaplan frente a las turbinas Francis presentan la ventaja de que se adaptan mejor a la variabilidad de la carga gracias a sus álabes orientables, tienen una curva de rendimiento plana mientras que la de las turbinas Francis es una curva de gancho, [Figura 2](#). Además las turbinas Kaplan pueden funcionar con normalidad con cargas por debajo del 40-50% de la máxima, sin producir remolinos a la salida que se propagan por el tubo de aspiración y producen choque a la entrada como pasa en las turbinas Francis.

Por otro lado las turbinas óptimas para instalaciones de pequeña altura y gran caudal, hasta 20 m, son las turbinas Kaplan.

Como las turbinas Kaplan tienen un precio elevado por el sistema de orientación de los álabes, se busca una solución más económica que consiste en la utilización de dos turbinas de hélice, que funcionen a plena carga, y una sola turbina Kaplan que será la encargada de la regulación. Las turbinas de hélice son más económicas porque los álabes son fijos y solo son adecuadas para trabajar a carga constante.

4.5. Potencia útil

Potencia neta o potencia absorbida (P_n) de cada turbina:

$$P_n = 128 \cdot 12 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 15,07 \text{ MW}$$

La potencia total de la instalación ($P_{n,t}$) es:

$$P_{n,t} = 45,20 \text{ MW}$$

La potencia útil o potencia en el eje (P_u) se calcula usando el rendimiento total, que es el producto del rendimiento volumétrico, hidráulico, mecánico y de rozamiento de disco y ventilación. Estos rendimientos se estiman (Mataix, 2009) como:

- η_v : entre 0,98 y 0,99
- η_h : entre 0,95 y 0,96
- η_m : superior a 0,97 y 0,98 según la potencia de la turbina
- η_{rv} : es muy pequeño

$$\eta_{tot} = 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,90$$

$$P_u = 15,30 \cdot 0,90 = 11,76 \text{ MW}$$

La potencia útil para toda la instalación es:

$$P_{u,t} = 11,76 \cdot 3 = 35,29 \text{ MW}$$

La potencia nominal para el anteproyecto para la renovación de la Central Hidroeléctrica de Peligre es de 45 MW y la potencia útil de 35,2 MW y cuenta con tres turbinas de 15 MW cada una y con una potencia útil de 11,7 MW.

4.6. Diámetro del rodete

Los cálculos para el anteproyecto inicial de la turbina se hacen según el texto Mataix, 2009. A partir de la altura neta, como se puede ver en la [Figura 27](#), se determina el número específico de revoluciones (n_s) mediante una curva que se ha realizado basándose en construcciones realizadas en diferentes países.

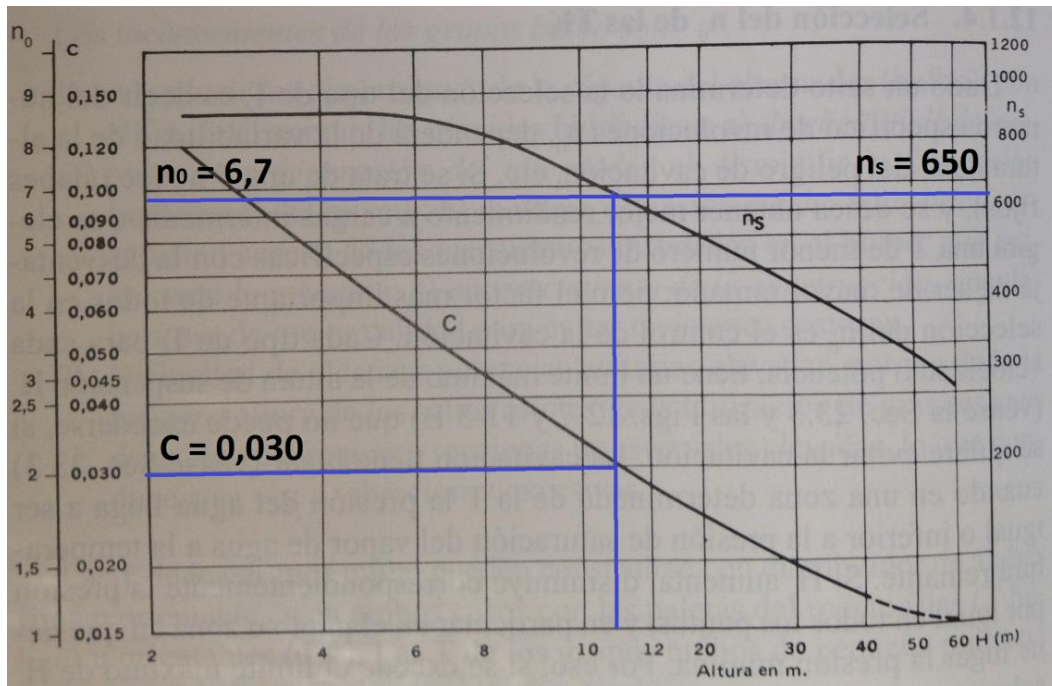


Figura 27: Valor de C, n_0 y n_s en función de la altura neta (Mataix, 2009)

De la Figura 27 se obtiene el valor de C, que es la relación entre el diámetro del rodete (d) y la potencia útil (P_u) y también se saca de numerosas construcciones hechas anteriormente.

$$C = 0,030$$

$$C = \frac{d}{\sqrt{P_u}}$$

$$d = C \cdot \sqrt{P_u} = 0,030 \cdot \sqrt{11,76 \cdot 10^3} = 3,04 \text{ m}$$

El diámetro del rodete es el que fija el tamaño de la turbina y en este caso es de 3 m. También se determina el número específico de revoluciones de la gráfica:

$$n_0 = 6,7$$

$$n_s = 650$$

El número específico de revoluciones es 650 y el diámetro del rodete para cada turbina es aproximadamente 3 m.

4.7. Número de revoluciones de funcionamiento

Se calcula el número de revoluciones de funcionamiento (n) en función del número específico de revoluciones, la potencia útil de cada turbina y la altura neta de la instalación:

$$n = \frac{n_s \cdot H^{5/4}}{\sqrt{P_u}}$$

$$n = \frac{650 \cdot 10,8^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{11,76 \cdot 10^3}} = 117,35 \text{ rpm}$$

La velocidad de funcionamiento que permite elegir el generador es 117 rpm.

4.8. Elección del generador

Para elegir el generador en primer lugar se calcula el número de pares de polos usando la frecuencia de Haití, 60 Hz:

$$p = \frac{60 \cdot 60}{100,07} = 30,68$$

Se necesita un generador de 31 pares de polos con una velocidad de sincronismo de 116,13 rpm, lo que es normal para saltos de pequeña altura y gran potencia. El inconveniente es que estos generadores aumentan el precio de la instalación y además son de gran tamaño. La mejor opción es el uso de un multiplicador de velocidad por medio de engranajes conectado a ambos ejes- Esta solución es más económica que la de utilizar un alternador especial que tendrá que ser construido bajo pedido, pero tiene como inconvenientes que aumenta las pérdidas, el ruido y el mantenimiento de la instalación.

Como se trata de turbinas de alta potencia es necesario usar un multiplicador con engranajes epicicloidales que permiten un diseño más compacto. La avería más común es debida al deterioro del circuito del lubricante, por lo que es recomendable realizar revisiones periódicas.

4.9. Cámara espiral y tubo de aspiración

El rendimiento de la turbina depende en gran parte de la eficiente recuperación de energía cinética en el tubo de aspiración, y tanto más cuanto mayor sea el n_0 en la misma. La cámara espiral realiza la admisión óptima de agua con dimensiones mínimas y rendimiento máximo. Para nuestro caso por ser una instalación de altura pequeña la cámara espiral será de hormigón.

Las dimensiones típicas del tubo de aspiración se calculan en función del diámetro del rodete anteriormente hallado. Para alturas mayores de 8 metros las medidas se calculan según las acotaciones de la [Figura 28](#).

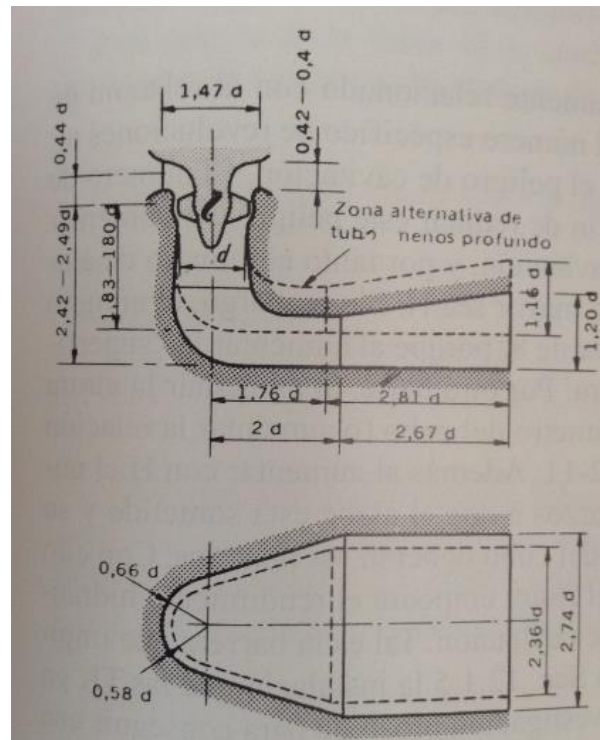


Figura 28: Dimensiones típicas del tubo de aspiración de una turbina Kaplan

4.10. Álabes del rodete

El número de álabes del rodete está relacionado con la relación de cubo (ν), con la altura neta (H_n) y con el número específico de revoluciones (n_0) de los cuáles depende el peligro de cavitación.

La relación de cubo tiene que ver directamente con el diámetro del cubo (d_0). Como se ve en la Figura 29 al aumentar la altura neta aumentan los esfuerzos que tienen que soportar los álabes y el cubo tiene que tener mayor diámetro.

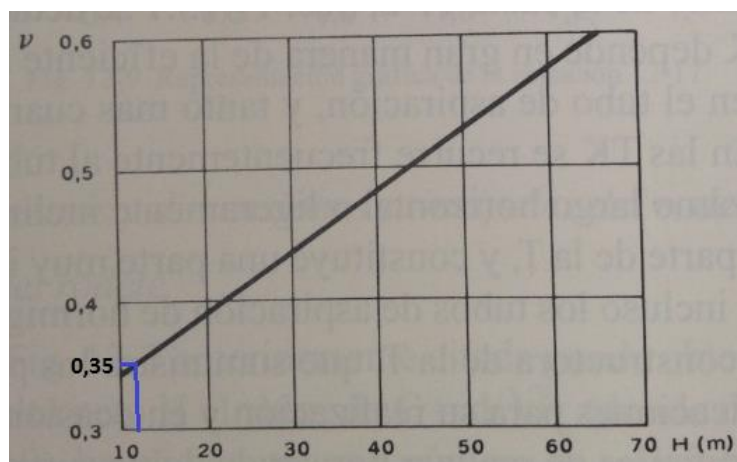


Figura 29: Relación de cubo en función de la altura neta. (Mataix, 2009)

La relación de cubo para cada una de las turbinas de Peligro vale 0,35.

El número de álabes (Z) debe evitar el peligro de cavitación, pero no debe ser mayor de 8 porque haría que hubiese una notable reducción del rendimiento. Para obtener el número de álabes se hará por medio de la [Tabla 20](#), donde se relaciona la altura con el número de álabes basándose en la experiencia.

Salto neto H (m)	5	20	40	50	60
Número de álabes, Z	3	4	5	6	8
Relación de cubo, v	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6

Tabla 20: Número de álabes y relación de cubo en función de la altura del salto. (Mataix, 2009)

Como el salto neto de la instalación es de 12 m, basándose en la tabla superior, el rodete va a tener 4 álabes.

4.11. Resumen de los valores obtenidos

En los apartados anteriores se ha calculado: el dimensionamiento de la turbina, las características principales del generador que se va a utilizar, así como la potencia que es capaz de proporcionar la planta de Peligre.

Para la instalación se van a colocar tres turbinas, de las cuáles dos serán turbinas de hélice y una será una turbina Kaplan. Estos dos tipos de turbinas son las adecuadas para pequeños saltos y caudales elevados. Sólo se usa una turbina Kaplan porque el sistema de orientación de los álabes para adaptarse a la carga variable hace que se incremente notablemente el precio de estas turbinas.

Cada turbina que se va a colocar tiene una potencia nominal de de 15 MW, lo que hace que la instalación tenga un total de 45 MW. La potencia útil es de 35,3 MW y la velocidad de rotación es 116m13 rpm. Se necesita un generador síncrono con 31 pares de polos y número específico de revoluciones: $n_s = 650$.

El rodete tiene un diámetro de 3 m y las medidas del tubo de aspiración pueden estimarse con la [Figura 28](#). El rodete tiene 8 álabes.

4.12. Comparación del montaje actual con el anteproyecto realizado

Con el montaje estudiado se podría conseguir 45 MW de potencia frente a los 54 MW que se consiguen actualmente en condiciones óptimas de funcionamiento. Por tanto, el nuevo diseño baja la potencia de la central, pero consigue que el factor de servicio aumente del 15 al 20 %.

Se ha decidido usar una turbina Kaplan en vez de una Francis porque la instalación tiene una altura pequeña y grandes caudales, y con estas características la opción más recomendable es el uso de una Turbina Kaplan. Además las turbinas Kaplan pueden funcionar con normalidad con cargas por debajo del 40-50% de la máxima.



Estos cambios supondrían una disminución de casi un 17 % en la potencia hidráulica total instalada en Puerto Príncipe y un 4 % en la potencia eléctrica total. Sin embargo, debido al mal estado de la central de Peligre, esta nueva propuesta multiplicaría por 3,5 la capacidad hidráulica disponible y aumentaría en un 25 % la capacidad disponible total de su capital Puerto Príncipe.

5. Estudio de caso: Gaillard

La central hidroeléctrica de Gaillard, [Figura 30](#), está situada en el Río Jacmel en el Departamento Sureste. La población se encuentra a 1027 m sobre el nivel del mar. En la [Tabla 21](#) aparece la información disponible del río.

RÍO	CAUDAL MÁXIMO (m3/s)	CAUDAL MÍNIMO (m3/s)	CAUDAL PROMEDIO (m3/s)
Artibonite	800	0,12	4,7

Tabla 21: Caudal del Río Jacmel. (PNUE, 2010)

El proyecto de la Central de Gaillard fue llevado a cabo en el año 1983 por KfW Bankengruppe, perteneciente al grupo bancario alemán KfW (KfW, 2006). Está englobado dentro de los proyectos de construcción de cuatro pequeñas centrales hidroeléctricas y su conexión a redes eléctricas existentes: Jacmel, Caracol, Délugé-Lanzac I y Délugé-Lanzac II.

El proyecto de Jacmel consistía en la construcción de la central de Gaillard con una capacidad instalada de 520 kW. Además el proyecto incluía un nuevo cable aéreo de 23kV a la estación de diésel de la ciudad y el acondicionamiento de la red existente. Todo el trabajo de construcción lo llevó a cabo una empresa municipal bajo la responsabilidad de EDH y el quipo fue montado por empresas alemanas.

El objetivo del proyecto era mejorar el suministro de energía eléctrica para contribuir al desarrollo de negocios de pequeña escala en la región, la producción esperada era de 3,8 GWh al año. El problema principal fue que no se pudo asegurar la fuente de alimentación a largo plazo porque estaba periódicamente fuera de servicio por su mantenimiento deficiente, los problemas financieros y las tensiones políticas y sociales del país. KfW concluye que en un entorno desfavorable un proyecto no puede tener el impacto beneficioso esperado ((Haiti: Small Hydropower Plants, 2006)

En los últimos años el proveedor de energía canadiense Hydro Quebec, con financiamiento de la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional, ha rehabilitado la central de Gaillard. Sigue actualmente en funcionamiento usando una turbina Pelton, [Tabla 11](#). La potencia instalada varía levemente según la fuente, según EDH y BME es 500 kW y según KfW es 520 kW.



Figura 30: Sala de máquinas central Gaillard

Bajo estas condiciones se puede calcular el factor de utilización que tiene la central en su construcción:

$$UF = \frac{3,8 \cdot 10^6}{520 \cdot 24 \cdot 365} = 83 \%$$

Como en los casos anteriores se va a analizar cuál es la mejor opción para esta instalación. Las variables disponibles son:

- Altura del salto o altura bruta: 210m
- Caudal promedio: 4,7m³/s

El caudal turbinable según el método para el caudal ecológico usado se calcula como:

$$Q = 4,7 - 0,25 \cdot 4,7 = 3,53 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1. Altura neta

Se estima la pérdida de la instalación en un 10% y se calcula la altura neta:

$$H_n = 210 - 0,10 \cdot 210 = 189\text{m}$$

5.2. Elección del tipo de turbina

En función del salto bruto y del caudal se va a obtener cuál es la turbina idónea para la instalación:

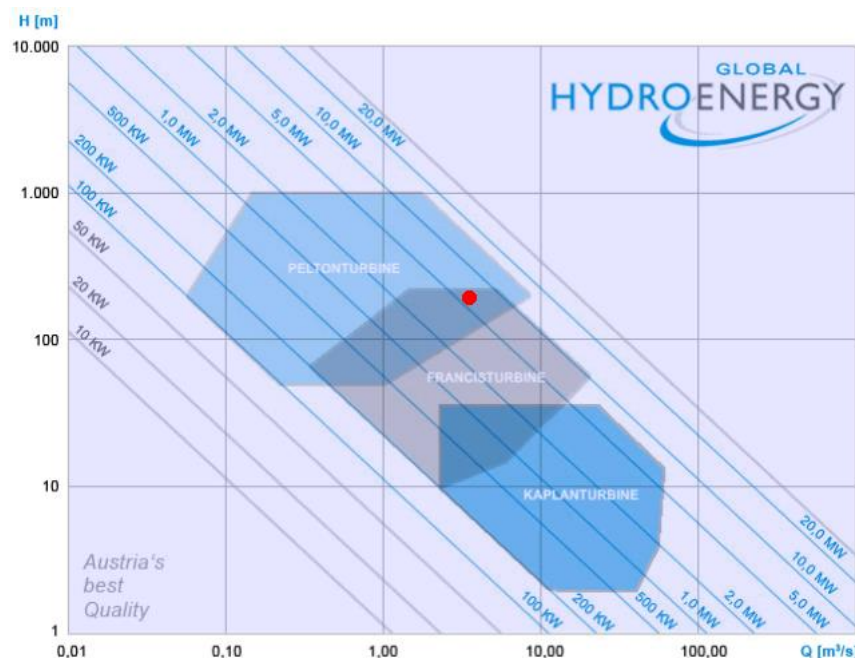


Figura 31: Elección gráfica del tipo de turbina para Saut Mathurine. (Global Hydro Energy, 2014)

Según la [Figura 31](#), donde se representa el punto de funcionamiento en rojo, se puede usar una Turbina Francis o una Pelton y la potencia instalada será algo mayor de 5 MW. Como es salto de gran altura se optará por una turbina Pelton por ser más robusta y su mantenimiento es más sencillo. Luego se comprobará si los valores obtenidos entran dentro del rango de valores típicos para una Turbina Pelton, usando la velocidad específica de la turbina.

Las instalaciones de 1 MW a 15 MW entran dentro de las pequeñas centrales, que se utilizan para proporcionar servicios, para usos productivos o mini industrias o para proporcionar electricidad a cerca de 30 familias. Las turbinas Pelton se usan para saltos de gran altura y pequeños caudales. Son turbinas tangenciales según la dirección del agua en el rodete. Las turbinas Pelton son turbinas de acción y se caracterizan por trabajar a presión atmosférica y por ser de admisión parcial, es decir, pocos álabes están activos simultáneamente.

Las principales partes de este tipo de turbinas son: el rodete ([Figura 32](#)), el distribuidor, los inyectores, la pantalla deflectora, una válvula de aguja y la carcasa.



Figura 32: Rodete e inyectores de una turbina Pelton

Se va a llevar a cabo un análisis más preciso del tipo de turbina, de las dimensiones del rodete y de los chorros de los inyectores usando como variable la velocidad específica y teniendo en cuenta las pérdidas. También se calcula los parámetros necesarios para la elección del generador.

5.3. Potencia útil

Potencia neta o potencia absorbida (P_n):

$$P_n = 3,53 \cdot 189 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 6544,94 \text{ kW}$$

La potencia útil o potencia en el eje (P_u) se calcula usando el rendimiento total, que es el producto del rendimiento volumétrico, hidráulico, mecánico y de rozamiento de disco y ventilación. Estos rendimientos se estiman (Mataix, 2009) como:

- η_v : entre 0,97 y 0,99
- η_h : entre 0,90 y 0,93
- η_m : superior a 0,97 y 0,995 según la potencia de la turbina (entre 75 y 75000KW)
- η_{rv} : es muy pequeño porque la parte no activa del rodete está en contacto con el aire y las pérdidas correspondientes se incluyen en el rendimiento mecánico.

$$\eta_{tot} = 0,97 \cdot 0,90 \cdot 0,98 = 0,85$$

$$P_u = 6544,94 \cdot 0,85 = 5563,20 \text{ kW}$$

La potencia nominal de la turbina que se va a instalar es 6,5 MW y la potencia útil estimada es 5,5 MW

5.4. Elección del número de chorros y la velocidad específica

La relación de diámetros (δ) es el cociente entre el diámetro del chorro y el diámetro característico de la turbina Pelton o diámetro del rodete (D). El diámetro D se define como el diámetro de la circunferencia con centro en el eje del rodete y tangente al eje del chorro.

$$\delta = \frac{d_0}{D}$$

Para turbinas de un único chorro el número específico de revoluciones se calculan:

$$n_0 = 1,31 \cdot \delta$$

$$n_s = 238 \cdot \delta$$

La velocidad n_0 es independiente del rendimiento total, pero n_s varía con éste.

Se denominan turbinas lentas a las que tienen n_0 pequeño. Una turbina lenta tiene un diámetro de rodete grande, un diámetro de chorro pequeño y unas cucharas pequeñas. Con las turbinas con n_0 grande o rápidas pasa lo contrario.

Para elegir la velocidad (n_0) y el tipo de turbina que vamos a usar hay que evaluar varios aspectos:

- Elegir el número de chorros (z) que va a tener. Hay que tener en cuenta que con varios chorros se consigue una máquina más compacta. Para esa elección se va a utilizar la [Tabla 14](#), donde aparecen los rangos típicos de la velocidad específica para los distintos tipos de turbinas.
- Elegir entre una máquina con menor número de revoluciones específicas y mayor rendimiento, o una con menor número de revoluciones y menor rendimiento. La última opción es más económica, porque necesita un alternador con menor número de pares de polos, y estos son más baratos.

En nuestro caso se va a elegir una turbina Pelton doble, es decir, un rodete y dos toberas, lo que implica que habrá dos chorros. El valor de δ igual a $1/7$. Este valor nos permite tener un rendimiento como el que habíamos estimado, 85%, y además será más económica. Con estos valores ya se puede calcular el valor del número específico de revoluciones:

$$n_0 = 1,31 \cdot 0,14 = 0,18$$

$$n_s = 238 \cdot 0,14 = 34$$

El número específico de revoluciones para la turbina es 34.

Se comprueba con la [Tabla 14](#) que la turbina se encuentra dentro del rango de velocidades específicas típico para una Turbina Pelton de 2 toberas. Este método es más preciso que el utilizado en apartados anteriores, permite descartar el uso de una Turbina Francis para la instalación.

5.5. Diámetro del chorro y diámetro del rodete

Para calcular el diámetro de un chorro en la vena contracta (d_0), en primer lugar se tiene que calcular el caudal de un chorro (Q_1):

$$Q_1 = \frac{Q}{z} = \frac{P_u}{g \cdot \eta_{tot} \cdot H \cdot z}$$

En este caso, como la turbina tiene dos chorros, el caudal de cada chorro es:

$$Q_1 = 1,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hay que conocer también el valor del coeficiente de velocidad (k_{c1}) que es debido a las pérdidas en el inyector y al valor de la altura z_1 . El valor de este coeficiente oscila entre 0,97 y 0,99 (Mataix, 2009).

De la ecuación de continuidad se deduce el valor del diámetro del chorro:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{k_{c1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \cdot \frac{Q}{z}}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{0,98} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 189}} \cdot \frac{3,53}{2}} = 0,19 \text{ m}$$

Conocida la relación de diámetros y el diámetro del chorro se calcula el diámetro del rodete:

$$D = \frac{d_0}{\delta} = 1,33 \text{ m}$$

El diámetro del rodete el 1,33 m, pero una vez conocido el generador que se va a utilizar habrá que recalcular dicho valor.

5.6. Diámetro de salida de la tobera

El diámetro de salida de la tobera (d) es siempre algo menor que el diámetro del chorro:

$$d = \frac{1}{C_c} \cdot d_0$$

Donde C_c es el coeficiente de contracción y suele oscilar entre 0,87 y 0,8. Se toma un valor medio y se obtiene:

$$d = 1,2 \cdot d_0$$

$$d = 1,2 \cdot 0,19 = 0,23 \text{ m}$$

5.7. Número de revoluciones de funcionamiento

Se calcula el número de revoluciones de funcionamiento (n) de la turbina a partir de la altura neta, la potencia útil y el número de revoluciones específica de la instalación:

$$n = \frac{n_s \cdot H^{5/4}}{\sqrt{P_u}}$$

$$n = \frac{34 \cdot 189^{5/4}}{\sqrt{5563,20}} = 319,44 \text{ rpm}$$

La turbina funciona aproximadamente a 319 rpm y permite saber el generador que se va a colocar en la instalación.

5.8. Elección del generador

Para elegir el generador en primer lugar se calcula el número de pares de polos:

$$p = \frac{60 \cdot 60}{319,44} = 11,27$$

Según la [Tabla 15](#) la velocidad de síncrona para un generador de 12 pares de polos es 300 rpm. Se va a acoplar directamente la turbina y el generador porque la velocidad de sincronismo no es excesivamente baja y los alternadores no tiene un precio demasiado elevado. Se recalcula con el valor de la velocidad de sincronismo: la velocidad específica, el diámetro del rodete y la relación de diámetros:

$$n_s = n \cdot P_u^{1/2} \cdot H_n^{-5/4}$$

$$n_s = 300 \cdot 5563,2^{\frac{1}{2}} \cdot 189^{-\frac{5}{4}} = 31,93$$

$$D = \frac{238 \cdot d_0}{n_s} = \frac{238 \cdot 0,19}{31,93} = 1,42 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{0,19}{1,42} = 0,13$$

Después del haber hecho el anteproyecto para la instalación se conoce que el diámetro del rodete es 1,42 m y el número específico de revoluciones es aproximadamente 32.

En la [Tabla 22](#) se representa en función de la altura neta el margen en el que se mueven los otros parámetros importantes de la turbina, los cuales dependen del tipo de turbina Pelton elegida. La altura neta más pequeña que aparece es 300 m, como en nuestra instalación nos encontraremos por debajo de esta, tomaremos como valor orientativo el de 300m.

Altura neta H (m)	Número específico de revoluciones		Relación de diámetros (δ)	Número de revoluciones reducido	Caudal reducido (Q_{11})	Número de cucharas
	n_o	n_s				
300	0,165 - 0,113	30 - 20,5	0,125 - 0,085	36,5 - 38,5	53 - 28,2	17 - 20
400	0,140 - 0,102	25,5 - 18,5	0,106 - 0,077	37 - 39	37,7 - 21,7	18 - 21
500	0,124 - 0,091	22,5 - 16,5	0,094 - 0,069	37,5 - 39,5	28,2 - 17,3	18 - 23
750	0,085 - 0,069	15,5 - 12,5	0,065 - 0,052	38 - 40	13,2 - 9,35	24 - 28
1000	0,058	10,5	0,044	39,5	6,38	27 - 31

Tabla 22: Parámetros orientativos de una Turbina Pelton según la altura neta (Mataix, 2009)

Los valores son ligeramente superiores a los máximos para una altura neta de 300 m, por lo que podemos concluir que la turbina se encuentra dentro de los márgenes orientativos de la tabla. El número de cucharas para una altura de 189 m estará por debajo de 17-20, por tanto para esta turbina se eligen 18 cucharas.

5.9. Resumen de los valores obtenidos

En los apartados anteriores, como en los otros estudios de caso, se han calculado los valores para el anteproyecto de la instalación: dimensionamiento de la turbina, las características principales del generador que se va a utilizar, así como la potencia que es capaz de proporcionar la planta de Gaillard.

Se ha optado por una turbina Pelton por tratarse de un salto grande y con un caudal pequeño. La potencia nominal de la instalación es 6,6 MW. La potencia útil es 5,6 MW y la velocidad de rotación es 300 rpm. Se va a utilizar un generador síncrono con 12 pares de polos y número específico de revoluciones: $n_s = 31,93$

El rodete tiene un diámetro de 1,42 m y cuenta dos chorros para que la turbina sea más compacta y ocupe menos. El rodete cuenta con 18 cucharas.

5.10. Comparación del montaje actual con el anteproyecto realizado

Basándose en el anteproyecto realizado se podría obtener 6,6 MW de potencia frente a los 0,5 MW instalados en la actualidad en condiciones óptimas de funcionamiento. Esto multiplicaría trece veces la potencia de la central de Gaillard.

Esto se puede conseguir gracias a la utilización de una turbina Pelton con una potencia mayor, que permite un mejor aprovechamiento del salto y del caudal existente, pero sin dejar de lado la sostenibilidad del entorno al tener en cuenta el caudal ecológico del río. Como es evidente, la turbina usada en la instalación es de mayor tamaño que la que se encuentra actualmente.

La central de Gaillard está en el Río Jacmel, en el Departamento Sur-Este del país, pero en la [Tabla 6](#) aparece englobado este departamento dentro de la Región Sur. Como pasaba con Saut Mathurine el proyecto permitiría un mayor acceso a la electricidad de los habitantes de la región y concretamente de las zonas cercanas a la central como Jacmel.

Con esa turbina se podría triplicar la potencia hidráulica instalada en el Departamento Sur del país y la capacidad disponible se multiplicaría algo más de 4 veces. Además esto supondría un aumento del 26 % en la potencia eléctrica total y un 58 % en la capacidad eléctrica, que pasaría de 10,8 MW en la actualidad a 17,1 MW.

6. Potencial y efecto de los nuevos proyectos

Los proyectos de renovación de las centrales hidroeléctricas de Saut Mathurine y Gaillard permiten un aumento de la potencia instalada en el Departamento Sur de Haití. Ambos contribuyen en la electrificación del país de una manera más económica que por medio de combustibles fósiles. Además ayudan a frenar la deforestación al usar una fuente energética distinta de la madera.

La central de Saut Mathurine pasaría de tener una potencia de 2,4 a 5,8 MW y la de Gaillard de 0,5 MW a 6,6 MW. Esto supondría un aumento de 9,5 MW en el Departamento Sur del país. La potencia hidráulica instalada multiplicaría por cuatro a la existente actualmente. Sin embargo, el aumento en la capacidad disponible es todavía más notable, se multiplica por seis la actual.

La potencia eléctrica total instalada se elevaría un 46 % y la capacidad disponible un 88 % respecto a la actual.

El aumento de la capacidad eléctrica en el Departamento Sur produciría un desarrollo en esta región, se podrían crear pequeñas empresas para el mantenimiento y se podría extender a otras actividades productivas como la pequeña industria, por ejemplo de tipo agrícola. Además se crearían empleos para llevar a cabo el proyecto de las dos centrales y requeriría la formación y capacitación de personas que se encargarían de llevar a cabo la gestión y el mantenimiento de las instalaciones. Estas centrales de pequeña potencia son capaces de suministrar iluminación a aproximadamente 30 familias.

El desarrollo productivo local tiene un gran potencial de lucha contra la pobreza de manera estable y duradera. Permite generar riqueza y desarrollo en un sentido integral. Pero para que estos proyectos de desarrollo energético local sean verdaderamente productivos, es imprescindible contar con la implicación completa de la comunidad beneficiaria. Ellos tienen que implicarse en el proceso y hacerlo suyo, es la única manera de garantizar el buen uso de las instalaciones y asegurar que no se deterioran al poco tiempo de ponerse en marcha.

El anteproyecto propuesto para la Central Hidroeléctrica de Peligre supone una disminución de la potencia instalada, de 54 MW en la actualidad a 45 MW. Sin embargo, el factor de servicio aumentaría y por tanto aseguraría mayor tiempo de funcionamiento de la instalación. Además la potencia disponible aumentaría, ya que actualmente se encuentra en malas condiciones los equipos electromecánicos, pasaría de 13 MW a 45 MW, lo que supone triplicar la potencia hidráulica disponible y aumentar en un 25 % la total en Puerto Príncipe.

El aumento de la energía generada en la capital permite aumentar la electrificación y que mayor número de personas tengan acceso a la cobertura eléctrica para mejorar el desarrollo humano en Haití. Como se ha comentado anteriormente la energía está presente en todas las actividades humanas y es imprescindible para el desarrollo y para poder llevar una vida digna. La electricidad es la forma de energía que proporciona más servicios y permite llevar a cabo muchas actividades: desde la iluminación, que permite un mayor aprovechamiento de las horas del día, hasta mayor industrialización al ser capaz de mover maquinaria.

Además la población de Haití sigue creciendo descontroladamente, sobretudo en la capital Puerto Príncipe, que aloja a casi el 40 % de la población del país. Esto y el aumento de la demanda eléctrica explican la importancia que tiene aumentar la producción de electricidad y la necesidad de crear nuevas instalaciones para producir energía y aprovechar al máximo las existentes.

Para cualquiera de los tres anteproyectos propuestos es fundamental plantearse, desde el principio del proyecto, la sostenibilidad técnica y económica de las soluciones elegidas. La experiencia muestra que un número importante de instalaciones, construidas mediante programas de ayuda al desarrollo, quedan abandonadas pasado un cierto tiempo. Frecuentemente, entre las causas se hallan las de no haber previsto los problemas cotidianos de mantenimiento, las necesidades de repuestos y su obtención, los requisitos de capacitación del personal o, en algunos casos, el no haber valorado adecuadamente los condicionantes de la sostenibilidad técnica y económica de las soluciones adoptadas. También hay que tener en cuenta en estos proyectos el factor social, en el que interviene la situación en la que se encuentra el país.

Se va a estimar cual es la energía generada en el país para luego poder analizar si los proyectos propuestos suponen algún cambio en el desarrollo de Haití. Se toma como referencia dos datos procedentes del International Energy Agency para el año 2011, ya que son los últimos datos que aparecen recopilados en la página. Para la energía procedente de los combustibles fósiles se toma el valor proporcionado por la IEA para el año 2011 (IEA, 2014), dicho valor es 567 GWh, también se obtienen 31 GWh de biocombustibles. En ese mismo año la energía generada gracias a la energía hidráulica es 120 GWh.

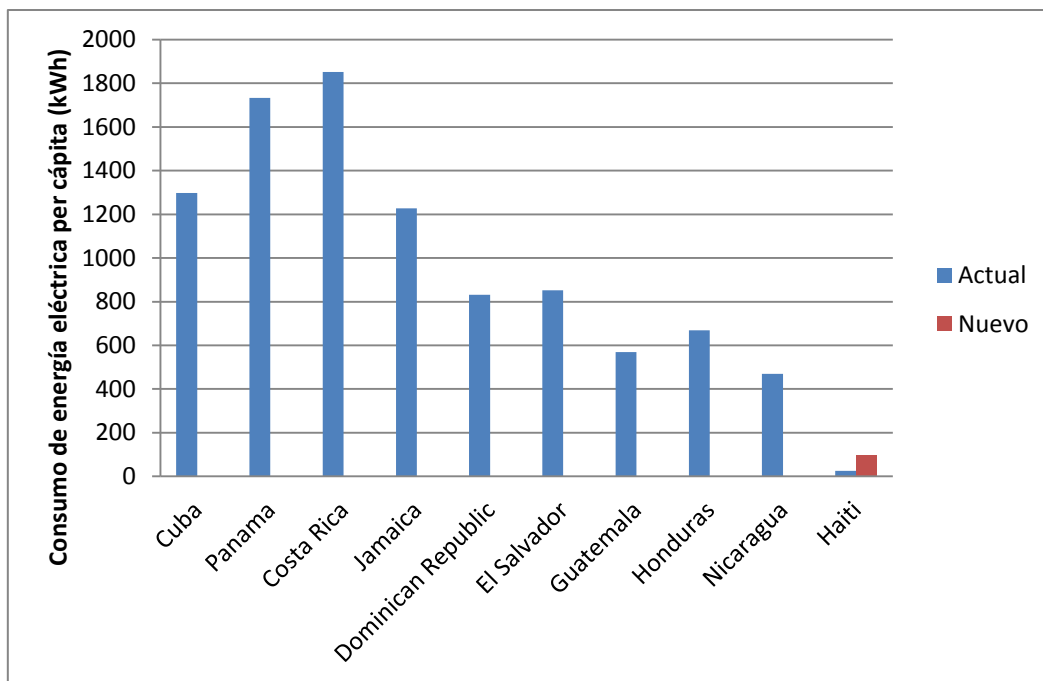
Para calcular la energía que sería producida si se llevan a cabo los proyectos mencionados anteriormente, se van a usar los valores calculados en los tres estudios de caso y además se va a aplicar un factor de utilización del 75 %.

$$E = 59,1 \cdot 0,75 \cdot 24 \cdot 365 = 388,29 \text{ GWh}$$

Para calcular el consumo per cápita es necesario conocer la población en el país en ese momento, se toma el valor aportado por IEA para el año 2011, 10 millones de habitantes y se obtiene como:

$$\text{Consumo per cápita} = \frac{567 + 31 + 388,29}{10} = 98,63 \text{ kWh}$$

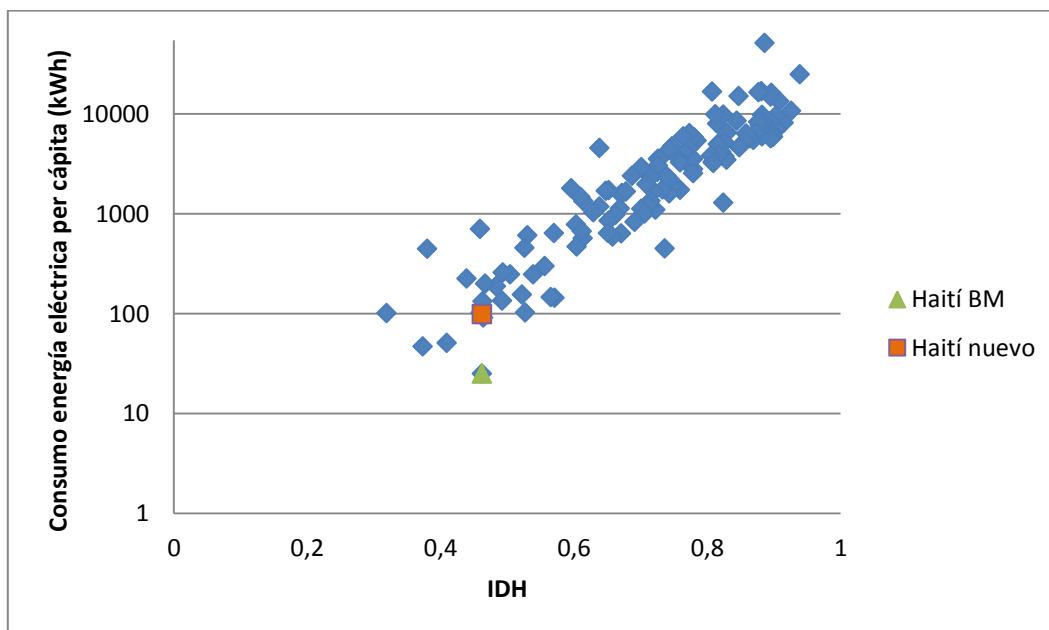
En la [Gráfica 14](#) se representa el consumo de energía eléctrica per cápita de algunos países de Centro América y el Caribe para poder comparar los resultados con los obtenidos para Haití. En azul aparecen representados todos los valores obtenidos de la página del Banco Mundial (BM, 2014) y en rojo el nuevo consumo per cápita para Haití si se llevan a cabo los nuevos proyectos de renovación y rehabilitación.



Gráfica 14: Consumo per cápita para los países de América Central y el Caribe

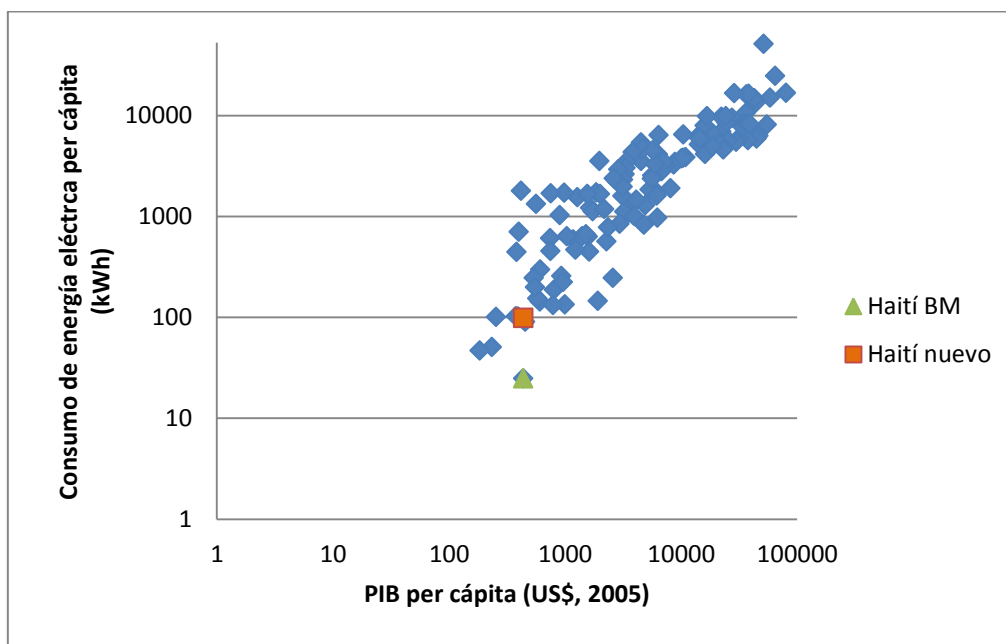
Con los nuevos proyectos se ve que hay un aumento importante del consumo de energía eléctrica per cápita en Haití, pero aun así está muy alejado de los otros países de la región y necesita otras fuentes de energía, además de la hidráulica, para poder estar en su nivel.

Si se representa el valor obtenido en las gráficas del capítulo tres que mostraban el consumo per cápita frente índice de desarrollo humano y el producto interior bruto per cápita, se podrá ver gráficamente el cambio que producirían los tres proyectos en la situación del país. Se representa con un cuadrado naranja los datos obtenidos con los nuevos proyectos, y con un triángulo verde los del Banco Mundial.



Gráfica 15: Consumo de energía eléctrica frente IDH

En la [Gráfica 15](#) aparece representado en consumo de energía eléctrica per cápita en kWh frente al índice de desarrollo humano. Se puede ver cómo ha habido un aumento del consumo en el país y esto si se utiliza correctamente se traduciría en un aumento del desarrollo como se ha comentado anteriormente, aunque es difícil de cuantificar.

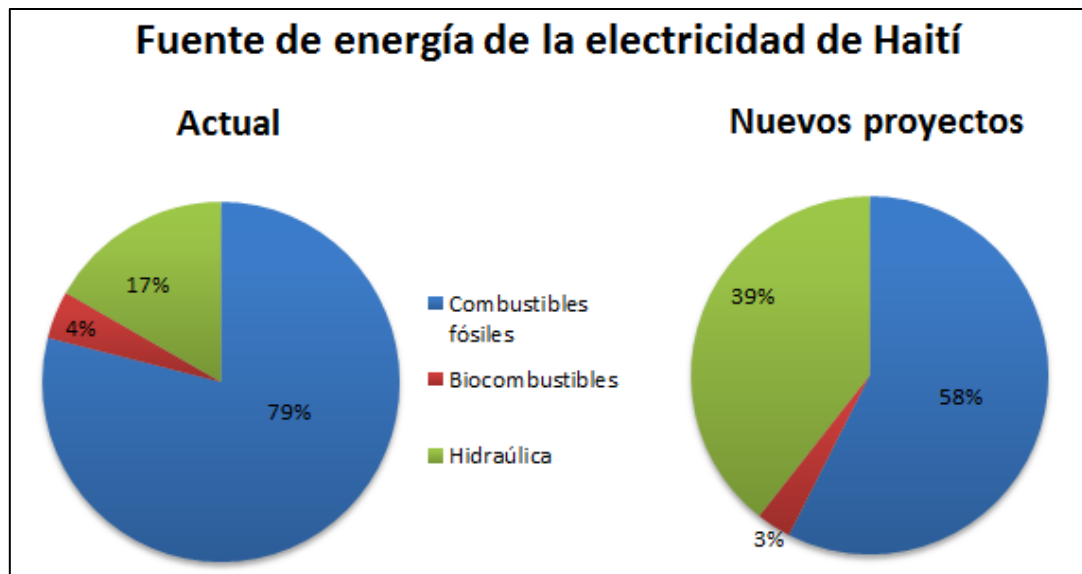


Gráfica 16: Consumo de energía eléctrica frente PIB per cápita

En la [Gráfica 16](#), como se podía observar también en la gráfica anterior, hay un aumento del consumo per cápita de energía eléctrica que conseguiría que Haití estuviera en una posición más alta y este hecho, si se aprovechan bien los recursos existentes, puede hacer que aumente el PIB per cápita si se consiguen crear pequeñas industrias en el país y generar empleo.

Indirectamente el aumento de la energía eléctrica repercute sobre más indicadores, como son: el uso de la energía, el porcentaje de energía renovable, el IDH, el PIB y la intensidad energética. Esto es debido a que la energía es necesaria para cualquier plan que tenga como objetivo reducir la pobreza y mejorar el desarrollo humano de las poblaciones. Sin embargo es difícil estimar como variarían estos indicadores, ya que no se sabe el impacto real que pueden tener dichos proyectos en Haití.

Se produciría un notable aumento en el porcentaje de energía eléctrica que se produce por medio de fuentes renovables como se ve en la [Gráfica 17](#) donde aparece representado a la izquierda como era el reparto en el año 2011 y a la derecha como quedaría si se tiene en cuenta el aumento de la energía hidráulica generada. El porcentaje de energía hidráulica dentro de la producción eléctrica pasaría de un 17 % a un 39 %.



Gráfica 17: Reparto según la fuente de energía eléctrica

Los anteproyectos realizados permiten un aumento de la energía renovable por medio de la energía hidráulica y esto tendría grandes repercusiones en el país. Además de aumentar la electrificación, permite una mayor independencia energética de Haití al no estar tan ligada la energía generada con los combustibles fósiles, que son importados por otros países.



5. Conclusiones

En Haití la principal fuente de energía es la biomasa y para la producción de energía eléctrica son las centrales térmicas, y en menor medida las centrales hidroeléctricas. El objetivo del trabajo es hacer un estudio completo de la energía hidráulica en Haití haciendo una recopilación bibliográfica, analizar la situación de las centrales hidroeléctricas existentes en el país, y proponer un plan de mejora que consiga aumentar la electrificación. El trabajo se engloba dentro del proyecto RENET, llevado a cabo por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), en colaboración con Universidades de Cuba y Haití. RENET tiene como objetivo general fortalecer la educación superior de calidad en el ámbito del acceso y la eficiencia energética, con especial atención a las Energías Renovables.

El principal problema encontrado durante la realización del trabajo fue la falta de datos y la disparidad entre las fuentes consultadas.

Se han recopilado datos de distintas fuentes para poder analizar la potencia instalada, la potencia disponible y la energía generada, todas ellas relacionadas con la energía hidráulica. Para la potencia instalada, después de consultar varias fuentes, se han escogido los datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) porque era la fuente donde aparecían más detallada la potencia según la central y la zona en la que estaban situadas, además eran coherentes con el resto de datos aportados. En el caso de la potencia disponible sólo hay datos del Banco Interamericano de Desarrollo, ya que es difícil encontrar información de cuál es la potencia disponible para las centrales minihidráulicas. Para la energía generada se han descartado los datos obtenidos del World Energy Council (WEC) porque el valor era muy elevado en relación a la potencia disponible en Haití, y se han tomado como válidos los datos de la International Energy Agency (IEA).

En parte, la disparidad de datos se debe a la falta de un organismo dedicado a la energía. Son muchos los Ministerios existentes dedicados actualmente al sector de la energía, pero ninguno de ellos se dedica específicamente a ello. Además todo se agrava por la falta de comunicación entre ellos y la sociedad implicada.

Actualmente, las centrales hidroeléctricas en el país están en mal estado porque sus componentes electromecánicos han finalizado su vida útil y por la sedimentación en las cuencas de los ríos, producida por la sobreexplotación de los bosques.

Se han propuesto una serie de anteproyectos en las centrales de Saut Mathurine, Peligre y Gaillard para poder rehabilitarlas y aumentar su potencia disponible e instalada. Es difícil poder realizarlos con precisión porque no se dispone de estudios hidrográficos concretos.

Los proyectos de renovación de las centrales hidroeléctricas de Saut Mathurine y Gaillard permiten un aumento de la potencia instalada en el Departamento Sur de Haití. La central de Saut Mathurine pasaría de tener una potencia de 2,4 MW a 5,8 MW y la de Gaillard de 0,5 MW a 6,6 MW. Esto supondría un aumento de 9,5 MW en el Departamento Sur del país. La potencia hidráulica instalada multiplicaría por cuatro a la existente actualmente. Sin embargo, el aumento en la capacidad disponible es todavía más notable, se multiplica por seis la actual.

El anteproyecto propuesto para la Central Hidroeléctrica de Peligre supone una disminución de la potencia instalada, de 54 MW en la actualidad a 45 MW. Sin embargo, el factor de servicio aumentaría y por tanto aseguraría mayor tiempo anual de funcionamiento de la instalación. Las mejoras suponen triplicar la potencia hidráulica disponible y aumentar en un 25 % la total en Puerto Príncipe.

Con el trabajo se pretende hacer un estudio completo de la energía hidráulica en Haití haciendo una recopilación bibliográfica, y proponer una serie de mejoras para las centrales hidroeléctricas instaladas en el país, aumentando la potencia disponible en ellas. Se han conseguido los objetivos del trabajo aunque es difícil asegurar la veracidad de los datos escogidos debido a las notables diferencias entre las fuentes. Con este trabajo se han conseguido datos suficientes como punto de partida para futuros proyectos de RENET en Haití.



6. Referencias

Agüera Soriano, José (1992). *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas* (3ª edición). Madrid.

Alstom. <http://www.alstom.com/power/renewables/hydro/>. Consultada en Julio de 2014.

Antunes Horta, C., Silva Guerra, D. R., Zárate Rocha, H. M. et al. (2010). *Guía de Acción: Rehabilitación de Fuentes Renovables de energía (hidroeléctricas) – RG-K1036*.

Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, L. et al. (2006). *The Challenge of Providing Environmental Flow Rules to Sustain River Ecosystems*. Ecological Society of America.
<http://www.jstor.org/stable/40062003>

BID, 2010. *Haiti: Energy Sector White Paper. Draft/ Final Report 18 Dec 2010*. Documentación: Banco Interamericano de Desarrollo.

BID, 2011. *Haití: Programa de Rehabilitación Electromecánica de la Central Hidroeléctrica Peligre (CHP) - HA-L1038. Informe de Gestión Ambiental y Social (IGAS/ESMR)*. Documentación: Banco Interamericano de Desarrollo.

BID, 2014 - Banco Interamericano de Desarrollo (BID). <http://www.iadb.org/es/proyectos>. Consultado en Abril de 2014.

BM, 2014 - Banco Mundial. <http://datos.bancomundial.org/indicador>. Consultado en Julio de 2014.

BME, 2014.a. - Bureau des Mines et de L'Énergie D'Haïti.
<http://www.bme.gouv.ht/energie/index.html>. Consultado en Junio de 2014.

BME, 2014.b. *Présentation du Bilan Énergétique d'Haïti*.
<http://www.bme.gouv.ht/energie/diagnost.html#bilan>. Consultado en Abril de 2014

Dixon, S.L. (1998). *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery* (4ª edición). Estados Unidos: Elsevier

EDH, 2014 - Electricite d'Haiti. http://www.edh.ht/nos_centrales.php. Consultado en Abril de 2014.

EIA, 2013. *International Energy Outlook 2013*. Documentación: U.S. Energy Information Administration. Office of Energy Analysis (Washington).

ESF, 2010. *Energía y cooperación. Guía de buenas prácticas*. Documentación: Fundación Energía Sin Fronteras.

ESHA, 2006 – European Small Hydropower Association. *Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica*.

PNUE, 2010. *État et Perspectives de l'Environnement*. Documentación: Programme des Nations Unies pour l'Environnement et l'appui du Ministère de l'Environnement d'Haiti avec l'aide technique de l'Université Quisqueya.

Gerval Octave, F., Marzolf, N., Kenol Thys. P. et al. (2011). *Haití: Programa de Transformación Institucional y Modernización del Sector Energético II - (HA-L1083)*. Documentación: Banco Interamericano de Desarrollo.

Global Hydro, 2014. <http://www.global-hydro.eu/nc/home/>. Consultado en Agosto de 2014.

Gómez, J.R., Trujillo, C., López, C. et al. (2011). *Haití: Programa de Rehabilitación de la Central Hidroeléctrica de Peligre (CHP): Primer Financiamiento - (HA-L1032)*. Documentación: Banco Interamericano al Desarrollo.

HEN, 2014 - Haiti Environment Network. Hosted by Columbia Blogs.
<http://blogs.cuit.columbia.edu/haitienviroment/>. Consultado en Agosto de 2014

IEA, 2014 - International Energy Agency.
<http://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?country=HAITI&product=electricityandheat&year=2010>. Consultado en Julio 2014.

IFC, 2012. *From Gap to Opportunity: Business Models for Scaling Up Energy Access*. Documentación: International Finance Corporation (IFC), World Bank Group (Washington).

ISF, 2014- Ingenieros Sin Fronteras. <http://www.isf.es/home/index.php>. Consultado en Agosto de 2014.

Kenol Thys, P., Marzolf, N., Gerval Octave, F. et al. (2013). *Haiti: Rehabilitation of Péligre Transmission Line- HA-G1030*. Documentación: Banco Interamericano de Desarrollo.

KfW, 2006. *Haiti: Small Hydropower Plants. Final follow -post evaluation*. Documentación: KfW Entwicklungsbank

KfW, 2014 - KfW Entwicklungsbank. <https://www.kfw-entwicklungsbank.de/Internationale-Finanzierung/KfW-Entwicklungsbank/>. Consultada en Julio de 2014

Koessler, 2014. <http://www.koessler.com/de>. Consultada en Agosto de 2014.

Marzolf, N., Kendrick, L., Mercado. J. et al. (2011). *Haití: Programa de Transformación Institucional y Modernización del Sector Energético II-HA-L1073*. Documentación: Banco Interamericano de Desarrollo.

Mataix, Claudio (2009). *Turbomáquinas hidráulicas. Turbinas hidráulicas, bombas y ventiladores* (2ª edición). Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.

MDE, 2001 - Ministere De L'Environnement. *Integrating the Management of Watersheds and Coastal Areas in Haiti. Haiti National Report*. Documentación: MDE, UNEP, GEF, UNDP, CEHI

Mercado, J., Kendrick, L., Trujillo, C. et al. (2011). Haití: *Programa de Transformación Institucional y Modernización del Sector Energético I- HA-L1065*. Documentación: Banco Interamericano de Desarrollo.

MTPTC, 2006. *Haiti Energy Sector Development Plan 2007 – 2017*. Documentation: Ministry for Public Works, Transportation and Communications, Bureau of Mines and Energy Electricity of Haiti, with the technical assistance of the International Atomic Energy Agency.

Ossberger, 2014. <http://www.ossberger.de/cms/es/hydro/>. Consultado en Agosto de 2014.

Parra Rodríguez, E. A. (2012). *Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales*. Tesis Doctoral: Universidad Nacional de Colombia.

Pérez-Foguet, A., Velo García, E., Sneij Martín, J. et al. (2006). *Tecnologías de la energía para el desarrollo. Tecnología para el Desarrollo Humano y acceso a los servicios básicos* (1ª edición). España: Ingeniería Sin Fronteras.

Renewable Facts (RF), 2014. <http://www.renewablefacts.com/country/haiti/hydro>. Consultado en Abril de 2014.

Riestra Gonzales, F. (2000). *Caudales ecológicos: Perspectiva desde la dirección general de las aguas*.

Smakhtin, V., Revenga, C. y Döll, P. (2004). *A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity*. *Water International*.

UHHP, 2014 - The United Haitians Home Page. http://www.uhhp.com/haiti/lake_rivers.html. Consultado en Julio de 2014.

UNDP, 2010. *UNDP and Energy Access for the Poor: Energizing the Millennium Development Goals*. Documentación: United Nations Development Programme.

UNDP, 2014 - United Nations Development Programme. <http://hdr.undp.org/es/data>. Consultado en Julio de 2014.

Viedma Robles, Antonio y Zamora Parra, Blas (2008). *Teoría y problemas de máquinas hidráulicas* (3ª edición). Murcia: Universidad Politécnica de Cartagena.



WEC, 2014 - World Energy Council.

<http://www.worldenergy.org/data/resources/country/haiti/>. Consultado en Abril de 2014.

White, Frank M. (2008). *Mecánica de fluidos* (6ª edición). España: McGraw-Hill Interamericana